



22

Frank Ritter

Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen

Modellierung und praxisnahe Prognose

DISSERTATION

Heft 22

Darmstadt 2011

Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen

Modellierung
und praxisnahe Prognose

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Frank Ritter

aus
Bessenbach / Unterfranken

D 17

Darmstadt 2011

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Tag der Einreichung:	26. Januar 2011
Tag der mündlichen Prüfung:	10. Juni 2011

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau
Petersenstrasse 12
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.to>

Ritter, Frank:

Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen
Modellierung und praxisnahe Prognose

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 22

ISBN 978-3-942886-00-0

Dr.-Ing. Frank Ritter

Geboren 1975 in Aschaffenburg. Von 1995 bis 2001 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2001 bis 2002 Mitarbeiter in der Philipp Holzmann Ingenieurgesellschaft für Bautechnik in Neu-Isenburg. Von 2002 bis 2007 Mitarbeiter im Ingenieurbüro Hock – Beratende Ingenieure GmbH in Haibach. Von 2007 bis Anfang 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit auch als freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt/Main und Ingenieurbüro Hock – Beratende Ingenieure GmbH in Haibach tätig. Seit 2011 Bauleiter bei der Adam Hörnig Baugesellschaft GmbH & Co. KG.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich aufrichtig für seine Unterstützung, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir eröffneten Möglichkeiten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht möchte ich sehr herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates danken.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Eric Brehm, Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing Torsten Mielecke und Frau Renate Mohr möchte ich mich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit bedanken.

Meinen Kollegen und Kolleginnen danke ich ganz besonders für die in beruflicher und privater Hinsicht ausgesprochen herzliche und angenehme Zeit am Institut, an die ich mich gerne erinnern werde. Meinen Zimmerkollegen Herrn Dipl.-Ing. Eric Brehm und Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Torsten Mielecke danke ich für das stets vorhandene Interesse und die Diskussionsbereitschaft bezüglich meiner Forschungsarbeit. Frau Renate Mohr danke ich für die vielfache Unterstützung im Rahmen der Datenerhebung.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern Ursula und Herbert Ritter für ihren fortwährenden Rückhalt, der mir insbesondere während meines Studiums eine große Hilfe war.

Der größte Dank gilt den beiden wichtigsten Menschen in meinem Leben, meiner lieben Mutter Ursula und meiner süßen Tochter Emilia Ritter, denen ich diese Arbeit widme. Ich bedaue zutiefst, dass sie sich nicht kennenlernen durften.

Darmstadt, Juni 2011

Frank Ritter

Zusammenfassung

Im Rahmen des gestiegenen Nachhaltigkeitsbewusstseins ist das Wissen um die realitätsnahe Lebenserwartung einer Konstruktion bzw. ihrer Bauteile sowohl für die Durchführung von Lebenszyklusanalysen als auch zur Planung von Instandsetzungsstrategien in zunehmendem Maße erforderlich.

Diese Arbeit enthält eine systematische Untersuchung der lebensdauerbeeinflussenden Faktoren von Bauteilen und Bauelementen. Anhand einer umfangreichen Datenerhebung werden Erfahrungswerte über die Lebensdauer von Bauteilen sowie deren Einflussgrößen gesammelt, um unter Berücksichtigung aktueller Bauteilkataloge und Literatur zu Bauschäden, die wesentlichen Einflussgrößen auf die Lebensdauer von Bauteilen identifizieren und quantifizieren zu können.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird ein Verfahren zur Vorhersage objektspezifischer Bauteillebensdauern in Abhängigkeit der wesentlichen Einflussgrößen entwickelt. Durch die Erweiterung mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen kann schließlich anhand einer qualitativen Bewertung von sieben Einflusskategorien die spezifische Lebensdauer je nach Kenntnis der Umgebungsbedingungen mit entsprechender Eintrittswahrscheinlichkeit vorhergesagt werden.

Somit können bereits bei der Planung von Gebäuden die entsprechenden Bauprodukte und Bauteile derart aufeinander abgestimmt werden, dass die Stoff- und Energieflüsse reduziert und die Lebenszykluskosten minimiert werden. Der Einsatz von Bauteilen und Baustoffen nach vordergründig wirtschaftlichen Gesichtspunkten kann zukünftig im Sinne einer lebenszyklusgerechten Planung vermieden werden.

Abstract

In the context of the growing awareness of sustainability issues, the knowledge of the realistic life expectancy of a structure or its components gains importance for both, the implementation in life cycle assessments and the planning of maintenance strategies.

The following provides a systematic study of factors affecting the service life of parts and components. On the basis of an extensive data collection, empirical data over the lifetime of components and their parameters are collected to identify and quantify the main factors influencing the service life of components, taking into account catalogues of currently used parts and literature on structural damage.

Based on these results, a method for specific service life prediction of components is developed including the main factors. Due to the stochastic approach using probability distributions, the specific service life for certain environmental conditions can finally be predicted with a qualitative assessment of seven categories of influence factors.

Thus, the building products and components can already be adapted to one another in the planning of buildings in such a way, that the material and energy flows are reduced and the life cycle costs are minimized. The use of components and materials, especially in terms of economic use, can be avoided in the future to achieve a more lifecycle-oriented design.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen, Variablen und Abkürzungen	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Vorgehensweise	3
2 Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie im Bauwesen	7
2.1 Vorbemerkung	7
2.2 Einführung	7
2.3 Definition von Grenzzuständen	7
2.4 Zufallsgrößen und ihre Verteilungen	10
2.4.1 Allgemeines.....	10
2.4.2 Normalverteilung	11
2.4.3 Logarithmische Normalverteilung	12
2.4.4 Weibull-Verteilung.....	12
2.4.5 Mehrdimensionale Zufallsgrößen und Verteilungen.....	14
2.4.6 Transformation von Verteilungen	15
2.5 Anpassung von Daten an Verteilungsfunktionen auf statistischer Basis.....	16
2.5.1 Allgemeines.....	16
2.5.2 Wahrscheinlichkeitspapier und Lebensdauernetz	17
2.5.3 Methode der Minimierung der Fehlerquadrate	18
2.6 Parameterschätzung anhand von Basisdaten	18
2.6.1 Allgemeines.....	18
2.6.2 Momentenmethode.....	19
2.6.3 Maximum-Likelihood-Prinzip	20
2.6.4 Data Updating nach Bayes	22
2.7 Lösungsverfahren der Zuverlässigkeitstheorie	27
2.7.1 Allgemeines.....	27

2.7.2	Momentenmethode (FOSM)	27
2.7.3	Monte-Carlo-Simulation	28
2.8	Zusammenfassung.....	29
3	Grundlagen der Lebensdaueranalyse.....	31
3.1	Einführung	31
3.2	Aktuelle Bestrebungen im Bereich der Lebensdauerermittlung	35
3.3	Grundlagen der Lebensdauerermittlung nach DIN ISO 15686	36
3.4	Abnutzung, Wertverlust und Alterungsverhalten	41
3.5	Unterhaltungs- und Instandhaltungsstrategien.....	45
3.6	Zusammenfassung.....	47
4	Kritische Analyse ausgewählter Verfahren zur Lebensdauerermittlung ..	49
4.1	Einführung	49
4.2	Kennwertemethode	49
4.3	Referenzfaktorenmethode von Tomm, Rentmeister und Finke	51
4.4	Faktorenmethode nach DIN ISO 15686.....	51
4.5	Wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden	55
4.5.1	Einführung.....	55
4.5.2	Alterungsmodell nach Markov	55
4.5.3	Weitere probabilistische Ansätze	57
4.6	Softwaremodelle zur Lebensdauervorhersage	58
4.7	Zusammenfassung.....	59
5	Auswahl und Gruppierung der Bauteile	61
5.1	Einführung	61
5.2	Detaillierung und Gliederung der Bauelemente.....	61
5.3	Sammlung von Lebensdauerdaten	62
5.4	Identifikation maßgebender Einflussgrößen	65
5.4.1	Allgemeines.....	65
5.4.2	Lebensdauern mit statistischer Auswertung.....	65
5.4.3	Erstinvestitions- und Folgekosten	66
5.4.4	Risikobasierte Kenngrößen	67

5.4.5	Robustheit und Fehleranfälligkeit	68
5.5	Auswahl und Gruppierung der maßgebenden Bauteile	70
5.6	Modellbildung und Detaillierung.....	71
5.7	Lösbarkeit von Schichten.....	72
5.8	Zusammenfassung.....	74
6	Einflussfaktoren auf die Lebensdauer.....	75
6.1	Einführung	75
6.2	Materielle Einflussfaktoren nach DIN ISO 15686.....	75
6.2.1	Allgemeines.....	75
6.2.2	Komponentenqualität (Faktor A)	76
6.2.2.1	Allgemeines	76
6.2.2.2	Produktqualität.....	76
6.2.2.3	Erfahrungswerte und Testberichte	77
6.2.2.4	Komplexität des Bauteils	77
6.2.2.5	Verfügbarkeit von Komponenten	77
6.2.3	Entwurfsqualität (Faktor B)	78
6.2.3.1	Allgemeines	78
6.2.3.2	Eingliederung in die Konstruktion.....	78
6.2.3.3	Qualität des Planungsteams	78
6.2.3.4	Komplexität des Entwurfs.....	79
6.2.3.5	Qualitätssicherung in der Planung	79
6.2.4	Ausführungsqualität (Faktor C)	79
6.2.4.1	Allgemeines	79
6.2.4.2	Qualität der Ausführung	79
6.2.4.3	Qualität des Projektmanagements.....	80
6.2.4.4	Klimatische Verhältnisse auf der Baustelle	80
6.2.4.5	Komplexität der Ausführung	80
6.2.4.6	Qualitätssicherung in der Ausführungsphase.....	80
6.2.5	Innenräumliche Umgebungsbedingungen (Faktor D).....	80

6.2.5.1	Allgemeines	80
6.2.5.2	Raumluftbedingungen	81
6.2.5.3	Temperatureinwirkung	81
6.2.5.4	Chemische Angriffe	81
6.2.5.5	Biologische Angriffe	82
6.2.6	Außenräumliche Umgebungsbedingungen (Faktor E)	82
6.2.6.1	Allgemeines	82
6.2.6.2	Standortbedingungen	82
6.2.6.3	Temperatureinwirkungen	83
6.2.6.4	Sonneneinstrahlung	83
6.2.6.5	Feuchtigkeit	84
6.2.6.6	Biologische Angriffe	85
6.2.6.7	Erschütterungen	86
6.2.6.8	Wind	87
6.2.7	Nutzungsintensität (Faktor F)	87
6.2.7.1	Allgemeines	87
6.2.7.2	Art der Nutzung	88
6.2.7.3	Mechanische Einflüsse	88
6.2.7.4	Verschmutzungs- und Reinigungsintensität	89
6.2.7.5	Optischer Anspruch	89
6.2.7.6	Aktualisierte Gebäudeinformation	89
6.2.8	Instandhaltungsniveau (Faktor G)	89
6.2.8.1	Allgemeines	89
6.2.8.2	Instandhaltungszyklus	90
6.2.8.3	Instandhaltungsqualität	90
6.2.8.4	Aktualisierte Gebäudedokumentation	92
6.2.8.5	Instandhaltungsfreundlichkeit	92
6.3	Immaterielle Einflüsse	93
6.3.1	Allgemeines	93
6.3.2	Funktionale Überalterung	93

6.3.3	Modische Obsoleszenz	93
6.3.4	Baurechtliche Obsoleszenz	94
6.3.5	Ökologische Überalterung	94
6.3.6	Ökonomische Obsoleszenz	94
6.3.7	Technische Überalterung	94
6.3.8	Sonstige immaterielle Einflüsse	94
6.4	Materialspezifische Einflüsse	95
6.4.1	Allgemeines	95
6.4.2	Einflüsse auf bewehrten und unbewehrten Beton	95
6.4.3	Einflüsse auf mineralische Bindemittel in Mörtel, Putz und Estrich	96
6.4.4	Einflüsse auf keramische Werkstoffe	97
6.4.5	Einflüsse auf Naturstein	99
6.4.6	Einflüsse auf Glas	99
6.4.7	Einflüsse auf Holz	100
6.4.8	Einflüsse auf Metalle	101
6.4.9	Einflüsse auf Kunststoff	103
6.5	Zusammenfassung	103
7	Erweiterung der Datengrundlage	105
7.1	Einführung	105
7.2	Entwicklung von Fragebögen und Interviewleitfaden	105
7.3	Durchführung und Ergebnisse der Erhebung	107
7.4	Datenqualität nach DIN ISO 15686-8 (2008)	111
7.5	Datenupdate nach Bayes	114
7.6	Zusammenfassung	116
8	Vorhersage objektspezifischer Lebensdauern	119
8.1	Einführung	119
8.2	Entwicklung des Einflussgrößenmodells	120
8.3	Ergebnisse in den einzelnen Bauteilgruppen	129
8.4	Darstellung maßgebender Bauteile in vereinfachter Übersicht	132

8.5	Erweiterung des Modells durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen.....	135
8.6	Modellverifikation in der Praxis	139
8.6.1	Allgemeines.....	139
8.6.2	Büro- und Geschäftshaus in innerstädtischer Lage	139
8.6.3	Verwaltungsgebäude im stadtnahen Randgebiet in Süddeutschland	142
8.7	Modellvergleich und Sensitivität	143
8.8	Zusammenfassung.....	149
9	Anwendung im Bereich Lebenszyklusanalyse	153
9.1	Einführung	153
9.2	Grundlagen der Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 und 14044	153
9.3	Einführung in die Lebenszyklusanalyse hybrider Innenbauteile	155
9.4	Ökologische Bewertung von hybriden Innenbauteilen.....	157
9.5	Ökonomische Bewertung von hybriden Innenbauteilen.....	160
9.6	Zusammenfassung.....	164
10	Resümee und Ausblick.....	167
11	Literaturverzeichnis.....	173
	Anhang.....	185
A	Bauelemente der Kostengruppe 300 nach DIN 276-1	187
B	Lebensdauerquellen	188
C	Liste der massgebenden Key-Komponenten.....	195
D	Beschreibung der Bauteilgruppen mit Schädigungsmechanismen.....	197
D.1	Fenster.....	197
D.2	Türen	198
D.3	Außenwandbekleidung, außen	199
D.4	Sonnenschutz	201
D.5	Innenwandbekleidung	202
D.6	Bodenaufbauten und -beläge.....	203
D.7	Deckenbekleidungen.....	204
D.8	Dachfenster und -öffnungen.....	205
D.9	Dachbeläge.....	206

D.10	Dachentwässerung und Schutzanlagen	208
E	Aggregations- und Schichtmodelle zusammengesetzter Bauteile	209
E.1	Fenster	209
E.2	Türen	211
E.3	Außenwandbekleidung, außen	213
F	Kartierungen der aussenräumlichen Umgebungsbedingungen	215
F.1	Allgemeines	215
F.2	Klimaübersicht für Mitteleuropa	215
F.3	Mittlere jährliche Sonnenscheindauer in Deutschland	216
F.4	Mittlere jährliche Niederschlagshöhe in Deutschland	217
F.5	Hagelschlagrisiko nach Schadenssätzen	218
F.6	Schneelastzonen nach DIN 1055-5 (2005)	219
F.7	Erdbebenzonen nach DIN 4149 (2005)	220
F.8	Windlastzonen nach DIN 1055-4 (2005)	221
G	Fragebogen der Datenerhebung	222
G.1	Musterfragebogen der Bauteilgruppe Fenster	222
H	Gesamtliste der untersuchten Bauteile	225
I	Umweltwirkungen von Wandbekleidungen und Bodenbelägen	235
H.1	Wandbekleidungen	235
H.2	Bodenbeläge	242

FORMELZEICHEN, VARIABLEN UND ABKÜRZUNGEN

Lateinische Buchstaben:

<i>a</i>	Robustheitsparameter eines Bauteils für die Alterung
<i>b</i>	Formparameter der Weibull-Verteilung
<i>BBR</i>	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
<i>BBSR</i>	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
<i>BMVBS</i>	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
<i>BTE</i>	Bund technischer Experten e. V.
<i>C</i>	Varianz-Kovarianzmatrix
<i>CE</i>	Produktkennzeichen (ehemals EG-Zeichen für „Europäische Gemeinschaft/en“)
<i>CIB</i>	International Council for Research and Innovation in Building and Construction
<i>DGNB</i>	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V.
<i>DIN</i>	Deutsche Industrienorm
<i>E</i>	Einwirkung
<i>E[X]</i>	Erwartungswert der Basisvariablen X
<i>EADS</i>	European Aeronautic Defence and Space Company
<i>EPIQR</i>	Energy Performance and Indoor Environmental Quality Retrofit
<i>ESLC</i>	Estimated Service Life of a Component
<i>FMEA</i>	Failure Mode and Effects Analysis
<i>g</i>	Grenzzustandsfunktion
<i>h</i>	Parameterwert
<i>H</i>	Fisher-Matrix
<i>HEV</i>	Hauseigentümerverband (Schweiz)
<i>IEMB</i>	Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.
<i>IFB</i>	Institut für Bauforschung e.V.
<i>ifbor</i>	Institute for Building Operations Research
<i>IP</i>	Impulsprogramm
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>JCSS</i>	Joint Committee on Structural Safety

k	Koeffizient der Momentenmethode
$KGr.$	Kostengruppe nach DIN 276-1
L	Likelihood-Funktion
L	Alterungskurve
LBB	Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung
LCA	Life Cycle Analysis
LCC	Life Cycle Costs
LN	Lognormalverteilung
$LVÖ$	Landesvereinigung für den ökologischen Landbau in Bayern e. V.
m	Parameterwert
m_x	Mittelwert der Basisvariablen X
$MEDIC$	Prediction Method of probable Deterioration Scenarios and Refurbishment Investment Budgets
n	Parameterwert
n	Anzahl, Stichprobenumfang
N	Normalverteilung
P_f	Versagenswahrscheinlichkeit
P_s	Überlebenswahrscheinlichkeit
R	Bauteilwiderstand
RSL	Referenzwert der Lebensdauer
$RSLC$	Reference Service Life of a Component
s	Parameterwert
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SLP	Service Life Planning
t	Alter eines Bauteils, Zeit
t	Zufallsgröße einer Verteilung
T	Lageparameter der Weibull-Verteilung
u	Versagenspunkt der Momentenmethode
U	Normalverteilte Zufallsgröße
v	Parameterwert
$v. a.$	vor allem

$VAR[X]$	Varianz der Basisvariablen X
V_x	Variationskoeffizient der Basisvariablen X
w	Wichtungsfaktor
W	Wert eines Bauteils
WLC	Whole Life Costs/Costings
x	Variable, Anzahl der simulierten Versagensereignisse
X	Zufallsgröße einer Verteilung
y	Variable
Y	Standardisierte Zufallsgröße

Griechische Buchstaben:

α	Parameterwert
β	Zuverlässigkeitsindex
Γ	Gammafunktion
δ	Dichtefunktion
Δ	Summe der Fehlerquadrate
θ_i	Parameterwerte
θ_x	Modellunsicherheit der Basisvariablen X
λ	Parameterwert
μ	Parameterwert
σ_x	Standardabweichung der Basisvariablen X
Φ	Verteilungsfunktion der Normalverteilung
χ^2	Verteilungsfunktion

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung und Motivation

Die Bedeutung der Lebensdauerermittlung im Bauwesen gewinnt im Rahmen des gestiegenen Nachhaltigkeitsbewusstseins immer mehr an Bedeutung. Kenntnisse über die Lebensdauer eines Gebäudes, sowie die Dauerhaftigkeit einzelner Bauteile und Materialschichten, sind für die Beschreibung des Lebenszyklus eines Bauwerks oder auch die Planung der Instandsetzungsstrategie unabdingbar. Die Lebensdauer von Bauelementen ist dabei keine deterministische Größe, sondern jeder angegebene Wert ist stets mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit verknüpft. Der Nachteil bei einer derart stochastischen Definition des Lebensdauerbegriffs: Eine statistisch gesicherte Aussage über die Lebensdauer von Bauelementen und deren Häufigkeitsverteilung erfordert eine aufwendige Auswertung von Lebensdauerdaten in Abhängigkeit von klassifizierten Randbedingungen. Aufgrund der langen Lebensdauer vieler Bauteile von teilweise über 100 Jahren, stehen bislang keine Daten zum praxisnahen Einsatz unter Berücksichtigung aller Einwirkungen zur Verfügung. Auch Kurzzeitalterungstests können nur für ganz spezielle Einflussfaktoren Rückschlüsse auf das Alterungsverhalten und die Lebensdauer liefern.

Die Lebensdauer von Bauelementen hängt nicht nur von einzelnen Materialien ab, deren Alterungsverhalten relativ zielsicher bestimmbar sind; sie wird auch von vielfältigen Einsatzrandbedingungen innerhalb eines Bauelementaufbaus beeinflusst, dessen Gesamtlebensdauer nicht mehr planmäßig zu bestimmen ist, weil es sich üblicherweise um einen Material-Mix handelt. Die Lebensdauer des Bauelementaufbaus wird von den Lebensdauern derjenigen Komponenten begrenzt, durch deren Ausfall eine Funktionserfüllung und Sicherheit des Bauelements in der vorliegenden Aufbaukombination nicht mehr gegeben ist. Bei hybriden Bauteilen müssen daher Lebensdauern nicht von einzelnen Materialien, sondern von kompletten System- und Ausführungsvarianten der Bauelemente ermittelt und gegenübergestellt werden. Hierzu sind Kriterien zu definieren, die das Ende der Lebensdauer beschreiben, wie z. B. Zuverlässigkeits-, Nutzungs- bzw. Funktionsbeeinträchtigung oder optische Beeinträchtigungen. Auch die Erfordernisse einer Teilinstandsetzung bzw. einer Reparatur, die den Restwert des Bauelements übersteigt, zählen zu solchen Kriterien. Weitere Merkmale sind denkbar, jedoch können Kriterien wie Mängel an Funktionalität, Aktualität oder Modernität und Konformität mit zukünftigen technischen Regeln nicht in die Betrachtung einbezogen werden.

In der Literatur stehen zahlreiche Quellen mit Lebensdauerdaten (z. B. BBSR (2009)) und Intervallkataloge für Instandhaltungsmaßnahmen (z. B. Hellerforth (2001)) zur Verfügung. Diese Angaben beruhen zumeist auf Erfahrungswerten aus der Praxis oder vereinzelten Herstellerangaben. Das folgende Beispiel der Lebensdauerangaben von Kunststoff-

fenstern (Abbildung 1-1) zeigt, dass die einzelnen Werte der verschiedenen Quellen zum Teil erheblich voneinander abweichen. Häufig wird eine Lebensdauerspanne angegeben, welche die minimale und die maximale Lebensdauer beschreibt.

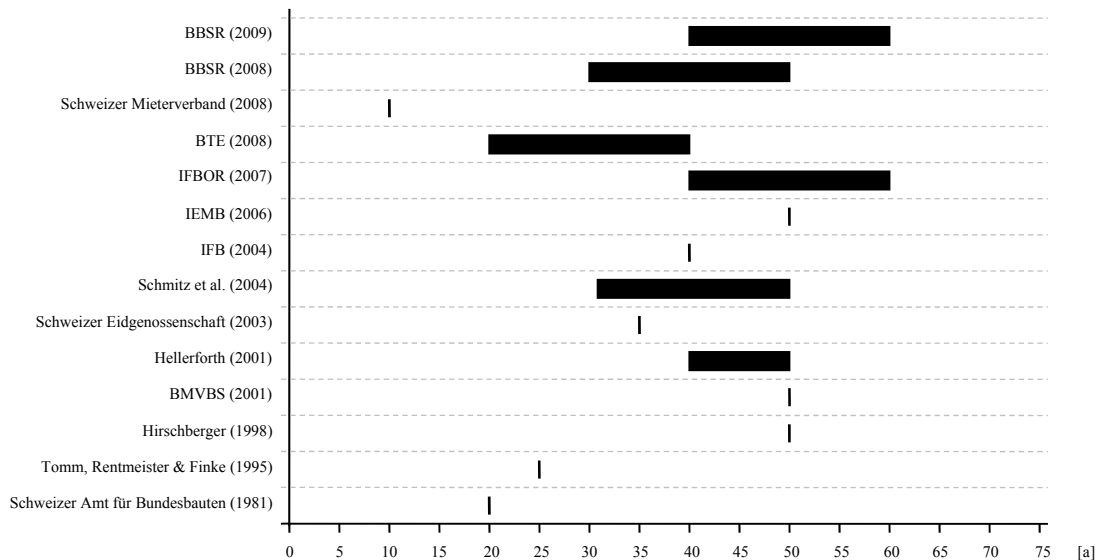


Abbildung 1-1: Lebensdauerschätzungen aus der Literatur am Beispiel Kunststofffenster

Die Gegenüberstellung verdeutlicht exemplarisch die Problematik hinsichtlich der genauen Angabe von Lebensdauern. Derartige Angaben sind deshalb kritisch zu hinterfragen. Aufgrund zahlreicher Faktoren, komplexer Zusammenhänge und Abhängigkeiten verschiedener Einflussgrößen gibt es keine „genauen“ Werte. Die Gründe für die großen Streubreiten und Abweichungen sind in Faktoren zu suchen, die das Alterungsverhalten der Bauteile beeinflussen. Dazu gehören z. B. die Qualität der Planung und der Ausführung, die Materialgüte und Materialauswahl, Nutzungs- und Umgebungsbedingungen oder die Instandhaltungsqualität.

Eine wesentliche Motivation dieser Arbeit besteht in der zuverlässigen, projekt- und bausystemspezifischen Abschätzung der Lebensdauern in Abhängigkeit der wesentlichen Einflussgrößen. Der Untersuchungsgegenstand bezieht sich auf die Kostengruppe 300 (Bauwerk – Baukonstruktionen) nach DIN 276-1 (2006). Es handelt sich dabei ausschließlich um Elemente von Neubauten bzw. Revitalisierungen, überwiegend aus dem Bereich öffentlich genutzter Gebäude. Die technischen Anlagen (Kostengruppe 400), Außenanlagen (Kostengruppe 500) und Ausstattungselemente (Kostengruppe 600) werden nicht betrachtet.

Des Weiteren soll der Frage der Trennung hybrider Bauteile mit Baustoffen unterschiedlicher Lebensdauer besondere Beachtung geschenkt werden. Verträgliches Zusammenfügen und Trennen einzelner Schichten reduziert die Kosten bei der Instandhaltung und Instandsetzung und bietet die Möglichkeit, verbrauchte Stoffe sortenrein in die Wertstoff-

kreisläufe zurückzuführen. Bisher vorliegende Kataloge zur Lebensdauer von Bauteilen treffen keine Aussagen zu dem genannten Problembereich.

1.2 Zielsetzung

Mit dieser Arbeit wird zunächst das Ziel verfolgt, eine breite Datenbasis mit praxisnahen Lebensdauern von Bauteilen und Baustoffen zu schaffen, die als Grundlage in vielen Bereichen der Lebenszyklusanalyse verwendet werden kann. Anhand von Erfahrungswerten aus der Praxis werden die wesentlichen Einflussgrößen auf die Lebensdauer von Bauteilen identifiziert und diese mit wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden hinsichtlich ihrer Auswirkungen quantifiziert. Die gewonnenen Informationen sollen im weiteren Verlauf zur Entwicklung eines Verfahrens führen, welches als Ergebnis die projektspezifische Prognose der Lebensdauer eines Bauteils in Abhängigkeit der wesentlichen Einflussgrößen liefert. Somit können bereits bei der Planung von Gebäuden die entsprechenden Bauprodukte und Bauteile derart aufeinander abgestimmt werden, dass Stoff- und Energieflüsse reduziert und die Lebenszykluskosten minimiert werden. Der oft eher zufällige Einsatz von Bauteilen und Baustoffen nach vordergründig wirtschaftlichen Gesichtspunkten sollte zukünftig im Sinne einer lebenszyklusgerechten Planung, die mit geringeren Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten einher geht, vermieden werden.

Das gewählte Verfahren wird an die Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 angelehnt, die als bisher einziges Verfahren zur Lebensdauerplanung bekannt ist. Nach Maydl & Schulter (2010) lassen sich die Ziele einer lebensdauergerichten Planung wie folgt zusammenstellen:

- Angabe der voraussichtlichen Lebensdauer unter bestimmten Einbaubedingungen
- Reduzierung der Betriebs- und Instandhaltungskosten
- Reduzierung des Aufwands für Reparatur, Rückbau und Entsorgung
- Abschätzung der Restlebensdauer eines Gebäudes bzw. Bauteils
- Bereitstellung von Grundlagen für die Planung der Instandhaltungs-, Nutzungsänderungs- und Rückbaukonzepte (Austauschzyklen, Trennbarkeit, etc.)
- Abgleich zwischen geplanter Nutzungsdauer des Gebäudes und der Lebensdauer von Bauprodukten und Bauteilen

1.3 Vorgehensweise

Die wissenschaftlich fundierte Analyse und Umsetzung von Ergebnissen aus einer Datenerhebung in ein Verfahren zur Prognose von Bauteillebensdauern erfolgt auf Basis der Statistik. Hierfür werden in Kapitel 2 zunächst die Grundlagen der Statistik und der

Wahrscheinlichkeitstheorie im Bauwesen dargestellt. Der Fokus liegt dabei auf der Parameterschätzung anhand von Basisdaten, insbesondere auf dem „Data Updating“ nach Bayes, bei dem der Stichprobenumfang durch zusätzliche Vorinformationen vergrößert wird und somit die im Vorfeld gewählten Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. deren Parameter durch weitere Angaben zutreffender abgeschätzt werden können (siehe u. a. Benjamin & Cornell (1970)). Darüber hinaus werden Lösungsverfahren der Wahrscheinlichkeitstheorie aufgezeigt, mit denen die gewählten Verteilungen berechnet und für die Anwendung in der Praxis aufbereitet werden können.

Nach einer grundlegenden Darstellung der Thematik der Lebensdauern, unter Einbeziehung des aktuellen Standes der Normung und Forschung, werden in Kapitel 3 die einzelnen Begriffe und Definitionen gegenübergestellt und verglichen. Im Bereich der Normungsbestrebungen wird vor allem die im Jahre 2000 veröffentlichte Normenreihe DIN ISO 15686 zum Thema „Service Life Planning“ beschrieben, die seitdem im Rahmen der internationalen Harmonisierung durch das Normungsgremium ISO TC59 SC14 überarbeitet und vervollständigt wird. „Service Life Planning“, d. h. die „Lebensdauerplanung“ wird in der Normenreihe als Gestaltungsprozess definiert, der sicherzustellen versucht, dass die Lebensdauer eines Gebäudes oder einer baulichen Anlage seiner geplanten Lebensdauer entspricht oder diese zeitlich überschreitet. Die fachgerechte Durchführung dieser Lebensdauerplanung wirkt sich somit durch die direkte Schonung von Ressourcen nicht nur positiv auf die Umwelt aus, sondern auch auf die Finanzierung von Bauwerken. Nach einer Darstellung und Abgrenzung verschiedener Alterungs- und Abnutzungskurven schließt das Kapitel mit einem kleinen Exkurs zu den Instandhaltungsstrategien sowie deren Maßnahmen und Auswirkungen.

Aufbauend auf den in Kapitel 3 beschriebenen Grundlagen der Lebensdaueranalyse werden in Kapitel 4 die bestehenden Verfahren zur Lebensdauerermittlung analysiert. Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die Praxis der Lebensdauerschätzung und zeigt Probleme bei der Anwendung entsprechender Methoden auf. Ausgehend von der Kennwertemethode, bei der Lebensdauerdaten aus der Praxis oder einzelnen wissenschaftlichen Untersuchungen verwendet werden, versuchen die im weiteren Verlauf des Kapitels beschriebenen Methoden, die lebensdauerbeeinflussenden Faktoren mit einzubeziehen und ihre Auswirkungen auf die Lebensdauer abzubilden. In diesem Kontext ist die Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 zu nennen, die die Grundlage des im weiteren Verlauf der Arbeit zu entwickelnden Modells bildet. Die weiterhin dargestellten wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden sind meist sehr materialspezifisch und nur auf wenige Einflussfaktoren spezialisiert. Ziel dieser Methoden ist die möglichst exakte Beschreibung des Alterungsprozesses mithilfe probabilistischer Ansätze, so dass sie üblicherweise nur ein bestimmtes Bauteil bzw. einen einzigen Schädigungsmechanismus erfassen können. Die Erläuterung verschiedener softwaregestützter Systeme am Ende des Kapitels gibt dem

Leser einige Hintergrundinformationen, die für eine fachgerechte Bewertung von Bauteilen erforderlich sind.

In Kapitel 5 werden vorhandene Datensammlungen gesichtet und auf Plausibilität geprüft. Anhand der DIN 276-1 (2006) werden die relevanten Kostengruppen identifiziert, deren Lebensdauern innerhalb des gewählten Betrachtungszeitraumes von 50 Jahren näher zu untersuchen sind. In diesem Zusammenhang wird auch die Zweckmäßigkeit einer Gliederung und Detaillierung in Abhängigkeit der Lebensspanne untersucht und diskutiert. Die konkrete Ausgestaltung einer Bauteilliste mit Festlegung der Detaillierungstiefe und des Umfangs der Typenunterscheidung erfolgt in diesem Bearbeitungsschritt. Die Hauptforschungsleistung in diesem Arbeitspaket wird in der Konzeption und Umsetzung einer konsistenten, einheitlich detaillierten und in der Praxis anwendbaren Strukturierung der Lebensdauerdaten gesehen. Den einzelnen Bauelementen wird dabei ein dem aktuellen Stand der Technik entsprechender unterer, mittlerer und oberer Wert der Lebensdauer zugeordnet. Die Zuordnung der Lebensdauern erfolgt auf Grundlage der recherchierten Angaben aus der Fachliteratur sowie Leitfäden und Normen. Des Weiteren wird ein Bewertungskatalog erstellt, der eine möglichst plausible Auswahl von maßgebenden Bauelementen unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen ermöglicht. Die Bauteile werden nach Gewerken gruppiert und unter Berücksichtigung der Instandhaltungsfreundlichkeit in Modellen aufbereitet.

Die wichtigsten Einflussgrößen auf die Lebensdauer von Bauteilen werden in Kapitel 6 erarbeitet. Getrennt nach dem materiellen und dem immateriellen Alterungsverhalten werden die verschiedenen Einflüsse erläutert und in Faktoren zusammengefasst. Die Faktoren orientieren sich an der Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 und beinhalten Bauteilqualität, Planungsqualität, Ausführungsqualität, innen- und außenräumliche Umgebungsbedingungen, Nutzungseinflüsse sowie die Qualität der Instandhaltung. Immaterielle Einflüsse können im Rahmen des Prognosemodells nicht betrachtet werden. Darüber hinaus wird ein kurzer Einblick in das materialspezifische Alterungsverhalten gegeben, wobei aufgrund des enormen Umfangs und der Komplexität dieser Thematik kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden kann. Ziel ist es vielmehr hinsichtlich dieser Thematik zu sensibilisieren und offensichtliche Auswirkungen und materialspezifische Risiken darzustellen.

Nach der Erarbeitung der maßgebenden Bauteile und der entsprechenden Einflussgrößen werden in Kapitel 7 die durchgeführten, umfangreichen Datenerhebungen bei Sachverständigen, Handwerkern, Herstellerfirmen usw. erläutert, die zu einer Verbesserung der Datenqualität der Lebensdauern und zu einer Erweiterung der Datengrundlage in Bezug auf Lebensdauereinflussgrößen führen. Neben der Beschreibung der Datenerhebung wird die Auswertung der Ergebnisse mit Plausibilitätsprüfung und Zusammenführung in die Gliederungsstruktur beschrieben. Mit dem Verfahren nach Bayes soll anschließend eine

Verbesserung der Datenqualität, sowohl bei den Lebensdauerdaten als auch bei den Einflussgrößen, erreicht werden, so dass eine hinreichende Datengrundlage zur Verfügung steht.

Den zentralen Teil dieser Arbeit bildet das Kapitel 8, in dem die zusammengetragenen Informationen über Lebensdauern und Einflussgrößen, unter Berücksichtigung der maßgebenden Schädigungsmechanismen, zur Quantifizierung der Einflussfaktoren verwendet werden. Es wird ein Modell entwickelt, dass auf Grundlage der Faktorenmethode erstmalig die Vorhersage von Bauteillebensdauern unter Berücksichtigung der objektspezifischen Randbedingungen ermöglicht. Durch die Erweiterung der Faktorenmethode mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen können auch Lebensdauerprognosen bei überwiegend unbekannten Einflussgrößen erstellt werden, so dass schließlich anhand einer qualitativen Bewertung von sieben Einflusskategorien die spezifische Lebensdauer je nach Kenntnis der Umgebungsbedingungen mit entsprechender Eintrittswahrscheinlichkeit vorhergesagt werden kann. Des Weiteren kann eine neue Datenbasis auf Grundlage der Wahrscheinlichkeitstheorie geschaffen werden, die sowohl neue Mittelwerte der technischen Bauteillebensdauern liefert, als auch mit 5%- und 95%-Fraktilwerten einen Vertrauensbereich aufspannt, der abgesicherte Aussagen im Bereich der Lebenszyklusanalysen zulässt. Das vorgeschlagene Modell wird anschließend anhand mehrerer konkreter Projekte auf seine Flexibilität geprüft und durch „wahre“ Bauteillebensdauern validiert. Der abschließende Modellvergleich mit Sensitivitätsanalyse zeigt die Vorzüge des neuen Prognosetools sowie die möglichen Auswirkungen der einzelnen Faktoren auf die spezifische Bauteillebensdauer.

Weitere Möglichkeiten der Anwendung von Modell und Datenbasis zeigt Kapitel 9. Als Datenbasis im Bereich der Lebenszyklusanalyse verdeutlicht die vorliegende Arbeit das breite Anwendungsspektrum und die Notwendigkeit von aktuellen Benchmarks bei LCA und LCC. Die Bewertung von Kosten und Umweltwirkungen bei Innenwandbekleidungen und Bodenbelägen dienen dabei nur als Beispiel für die Relevanz der Lebensdauer in diesen Bereichen.

Kapitel 10 schließt mit einer Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit und gibt einen kurzen Ausblick auf sinnvolle zukünftige Forschungsaktivitäten im Bereich der Lebensdauerermittlung von Bauteilen.

2 GRUNDLAGEN DER ZUVERLÄSSIGKEITSTHEORIE IM BAUWESEN

2.1 Vorbemerkung

In den folgenden Kapiteln wird ein kurzer Einblick in die Zuverlässigkeitstheorie gegeben, die als Teil der Stochastik bei ingenieurtechnischen Fragestellungen nicht mehr wegzudenken ist. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, wird der Umgang mit zufälligen Ereignissen, geschätzten Größen und die Anpassung von Parametern anhand von Basisdaten in kurzen Ausschnitten beschrieben. Grundkenntnisse der Statistik und der stochastischen Prozesse werden dabei weitestgehend vorausgesetzt. Eine umfassende Darstellung der Grundlagen und Zusammenhänge findet sich z. B. bei Benjamin & Cornell (1970). Als weiterführende Arbeiten zur Sicherheits- und Zuverlässigkeitstheorie im Bauwesen sind Spaethe (1987), Faber (2005) und vor allem Rackwitz (1982, 2000 und 2004) zu nennen.

2.2 Einführung

Bauteile und Bauelemente haben im Rahmen ihrer Nutzungsdauer eine Reihe von Funktionen, wie z. B. Sicherheit, Wasserdichtigkeit oder Ästhetik, zu erfüllen. Die wichtigste Anforderung an konstruktive Elemente ist dabei die Gewährleistung einer hinreichenden Sicherheit für Leib und Leben, während für viele Bauteile des Ausbaus die Aufrechterhaltung des Betriebs als wichtigste Funktion über der Nutzungsdauer anzusehen ist. Alle Annahmen, die im Rahmen der Planung bzw. Bemessung von Bauwerken getroffen werden, unterliegen statistischen Unsicherheiten. Dazu gehören u. a. zufallsbedingte Variationen der Materialparameter, unterschiedliche Einbauqualitäten, unvorhersehbare Umweltbedingungen oder Wechsel in der Instandhaltungsstrategie.

In der normativen Umsetzung und Planung werden derartige Unsicherheiten vereinfacht durch das globale Sicherheitskonzept oder durch die Einführung von deterministischen Teilsicherheitsbeiwerten erfasst, mit denen im Rahmen der Bemessung die Einwirkungen erhöht und der Tragwerkswiderstand reduziert wird. Für die Elemente des Ausbaus liegen derartige Bemessungsformeln nicht vor, so dass auf subjektive Erfahrungswerte und Expertenmeinungen zurückgegriffen werden muss.

2.3 Definition von Grenzzuständen

Als Grenzzustand eines Bauelements wird der Zustand bezeichnet, bei dessen Überschreiten das Bauteil oder das gesamte Tragwerk aufhört, den gestellten Anforderungen zu entsprechen. Grenzzustände lassen sich nach dem Grad der Einschränkung der Nutzungsfähigkeit und der Höhe möglicher Versagensfolgen in zwei Gruppen einteilen

(DIN 1055-100 (2001)). Zur ersten Gruppe gehören die Grenzzustände, bei deren Überschreiten der völlige Verlust der Tragfähigkeit eintritt. Zu dieser Gruppe gehören:

- allgemeiner Stabilitätsverlust
- Verlust der Standsicherheit
- Verlust der Lagesicherheit
- Bruch beliebiger Art
- Übergang in ein kinematisches System
- Versagen durch Materialermüdung oder andere zeitabhängige Auswirkungen.

Bei Überschreiten dieser Grenzzustände besteht häufig Gefahr für Leib und Leben und es sind größere materielle Schäden zu erwarten. Zur zweiten Gruppe gehören die Grenzzustände bei deren Überschreitung die Gebrauchstauglichkeit eingeschränkt wird, wie z. B.

- unzulässige Verformungen und Verschiebungen
- unzulässige Schwingungen
- Schäden, die voraussichtlich die Funktionsfähigkeit, die Dauerhaftigkeit oder das Erscheinungsbild nachteilig beeinflussen
- sichtbare Schäden durch Materialermüdung oder andere zeitabhängige Auswirkungen.

Bei Überschreiten dieser Grenzzustände besteht üblicherweise keine Gefahr für Leben und Gesundheit und die materiellen Schäden sind in aller Regel geringer, treten aber deutlich häufiger auf. Ein Grenzzustand kann sich auf die Gesamtkonstruktion oder nur auf einzelne Elemente oder Querschnitte beziehen. In der Regel kann ein Bauteil nach mehreren Grenzzuständen versagen.

Die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit aus Schadensstatistiken ist im Bauwesen eher unüblich. Wegen der kleinen Versagenswahrscheinlichkeiten und der daraus resultierenden geringen Anzahl an Schadensfällen steht der erforderliche Stichprobenumfang vor allem bei den tragenden Bauteilen oft nicht zur Verfügung. Die Versagenswahrscheinlichkeit wird daher meist rechnerisch bestimmt, was jedoch voraussetzt, dass durch statistische Erhebungen fundierte stochastische Modelle der Basisvariablen vorliegen und dass sich die Grenzzustandsfunktion (siehe Gleichung (2.3)) mathematisch formulieren lässt. Beides ist im Bauwesen für einzelne Grenzzustände in der Regel hinreichend erfüllt.

Es ist zu beachten, dass die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit nicht der tatsächlichen Wahrscheinlichkeit für das Bauteilversagen nach einem bestimmten Grenzzustand entspricht, d. h. sie lässt keine Prognosen über die tatsächliche Häufigkeit von Schadensfällen zu und kann auch nicht mit Hilfe von Schadensstatistiken überprüft werden. Dies

ist darauf zurückzuführen, dass nie alle Streugrößen bzw. Basisvariablen berücksichtigt werden. Vor allem der Einfluss menschlichen Fehlverhaltens kann in dieser Versagenswahrscheinlichkeit nicht erfasst werden. Da sich sowohl die veränderlichen Einwirkungen, als auch die Baustoffeigenschaften mit der Zeit ändern, ist auch die Größe der Versagens- bzw. Überlebenswahrscheinlichkeit zeitabhängig. So steigt z. B. die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten extrem großer Beanspruchungen (z. B. durch Schneelasten) mit der Nutzungsdauer, während andererseits der Tragwerkswiderstand durch Alterungerscheinungen sinken kann (z. B. durch Versprödung). Die Versagenswahrscheinlichkeit gilt daher immer nur für einen bestimmten Bezugszeitraum und steigt mit größer werdendem Bezugszeitraum monoton an.

Die Bauteilzuverlässigkeit bezeichnet die Eigenschaft eines Bauelements, während seiner Nutzungsdauer mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zu versagen bzw. seine Gebrauchstauglichkeit zu behalten. Ein sinnvolles Maß für die Zuverlässigkeit wäre demnach die Überlebenswahrscheinlichkeit P_s . Das „Überleben“ bzw. Nicht-Versagen des Bauteils P_f ist das Komplementärereignis zum Bauteilversagen, weshalb der in Gleichung (2.1) gegebene Zusammenhang zwischen den Wahrscheinlichkeiten der beiden Ereignisse gilt.

$$P_f + P_s = 1 \quad (2.1)$$

Wegen der geringen zulässigen Versagenswahrscheinlichkeiten für tragende Bauteile nimmt P_s jedoch wenig anschauliche Werte an. Daher wird im Bauwesen üblicherweise die Versagenswahrscheinlichkeit P_f bzw. der Zuverlässigkeitsindex β zur Quantifizierung der Bauteilzuverlässigkeit verwendet. Der Zuverlässigkeitsindex β entspricht (unter der Annahme einer normalverteilten Grenzzustandsfunktion) dem negativen Argument der Standardnormalverteilung Φ für die Versagenswahrscheinlichkeit P_f eines Bauteils bzw. dem Argument von Φ für die Überlebenswahrscheinlichkeit P_s (siehe Gleichungen (2.2)).

$$P_f = \Phi(-\beta) \text{ bzw. } \beta = -\Phi^{-1}(P_f) \text{ bzw. } \beta = \Phi^{-1}(P_s) \quad (2.2)$$

Ob ein Bauteil auf eine bestimmte Art und Weise versagt, kann z. B. durch die Grenzzustandsfunktion $g(x)$ entsprechend Gleichung (2.3) bestimmt werden. Der Wert der Grenzzustandsfunktion entspricht der Differenz zwischen Bauteilwiderstand R und Beanspruchung E . Somit gilt für Versagen $g(x) < 0$ und für Nicht-Versagen $g(x) > 0$. Bei $g(x) = 0$ ist der Grenzzustand erreicht, d. h. der Zustand, der den Versagensfall vom Nicht-Versagensfall (bzw. Überlebensfall) trennt. Die Grenzzustandsfunktion gilt immer nur für jeweils einen Versagensmechanismus (z. B. chloridinduzierte Korrosion bei Stahlbetonbauteilen). Nicht einheitlich sind die Auffassungen darüber, ob der Grenzzustand dem sicheren Bereich oder dem unsicheren Bereich zuzuordnen ist. Für diese Arbeit ist dieser Unterschied ohne Bedeutung, da für stetiges $g(x)$ auch $P(g(x)=0)=0$ ist.

$$g(x) = R(x_R) - E(x_E) \quad (2.3)$$

Sowohl der Bauteilwiderstand als auch die Einwirkungen sind Funktionen der Basisvariablen (oder Basisgrößen) x_R und x_E . Diese Basisvariablen sind ausschließlich Zufallsgrößen, die mehr oder weniger stark um ihren Mittelwert streuen. Deterministische Größen werden hier nicht zu den Basisvariablen gezählt.

2.4 Zufallsgrößen und ihre Verteilungen

2.4.1 Allgemeines

Zur Beschreibung von beliebigen Zufallsgrößen bzw. deren Verteilung werden neben der Verteilungsfunktion die zugehörigen statistischen Parameter benötigt. In Anlehnung an die technische Mechanik spricht man in diesem Zusammenhang von statistischen Momenten. Als Momente erster und zweiter Ordnung bezeichnet man dabei den Mittelwert und die Standardabweichung. Momente höherer Ordnung werden in der Regel nicht betrachtet.

Der Mittelwert, welcher dem Erwartungswert entspricht, lässt sich für diskrete Basisvariablen folgendermaßen berechnen:

$$m_X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.4)$$

Analog gilt für den Fall einer kontinuierlichen Verteilung:

$$m_X = E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f_X(x) dx \quad (2.5)$$

Die Varianz ist ein Maß für die Unsicherheit einer Zufallsvariablen. Für eine diskrete Verteilung kann sie wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_X)^2 \quad (2.6)$$

Für den Fall einer kontinuierlichen Verteilung ergibt sich:

$$\sigma_X^2 = VAR[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_X)^2 \cdot f_X(x) dx \quad (2.7)$$

Gebräuchlicher als die Varianz ist die Standardabweichung, welche sich aus der positiven Wurzel der Varianz berechnet.

$$\sigma_X = \sqrt{VAR[X]} \geq 0 \quad (2.8)$$

Die Standardabweichung allein ist nicht aussagekräftig, um die Streuung zweier Verteilungen miteinander vergleichen zu können, da die Standardabweichung vom Mittelwert abhängt und dimensionsbehaftet ist. Besser geeignet ist der Variationskoeffizient, der als dimensionslose Größe zur Beschreibung der Streuung einer Basisvariablen definiert ist:

$$V_X = \frac{\sigma_X}{m_X} \quad (2.9)$$

Im Folgenden werden zunächst einige wenige stetige Wahrscheinlichkeitsverteilungen für eindimensionale Zufallsgrößen dargestellt, die für das Verständnis der weiteren Arbeit von Bedeutung sind. Anschließend erfolgt ein kurzer Exkurs zu mehrdimensionalen Zufallsgrößen.

2.4.2 Normalverteilung

Die Normalverteilung nach Gauß ist, neben ihrer zentralen Bedeutung in der Natur, von fundamentaler Bedeutung für die Wahrscheinlichkeitstheorie, da für Probleme von normalverteilten Zufallsvariablen, sofern sie linear verknüpft sind, einfache Lösungen existieren. Diese werden häufig für Näherungslösungen allgemeiner Probleme herangezogen.

Die Normalverteilung wird über Mittelwert m_x (Gleichung (2.5)) und Standardabweichung σ_x (Gleichung (2.8)) definiert und besitzt die Verteilungsdichte nach Gleichung (2.10).

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - m_x}{\sigma_x}\right)^2\right) \quad (2.10)$$

$$F_X(x) = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u - m_x}{\sigma_x}\right)^2\right) du \quad (2.11)$$

Die Verteilungsfunktion nach Gl. (2.11) hat die bekannte Form einer symmetrischen Glockenkurve. Der Abstand zwischen Mittelpunkt und Wendepunkt entspricht der Standardabweichung σ_x .

Führt man die standardisierte Zufallsgröße Y mit $m_Y = 0$ und $\sigma_Y = 1$ in Gleichung (2.10) und (2.11) ein, so führt dies zu den Funktionen $\varphi_{(Y)}$ und $\Phi_{(Y)}$.

$$Y = \frac{X - m_x}{\sigma_x} \quad (2.12)$$

$$\varphi_{(Y)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) \quad (2.13)$$

$$\Phi_{(y)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^y \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (2.14)$$

Die Normalverteilung nach Gauß beinhaltet die Problemstellung, dass sie sich in positiver wie negativer Richtung ins Unendliche erstreckt, d. h. auch beliebig große negative Werte annehmen kann. Dies ergibt für viele Basisvariablen wie z. B. Materialfestigkeiten, Raumgewichte oder auch für Lebensdauerangaben keinen Sinn. Werden solche Größen durch Normalverteilungen abgebildet, so entsteht ein Fehler, der mit größer werdendem Variationskoeffizienten anwächst. Bei großen Variationskoeffizienten wird es oftmals zweckmäßig sein, ein theoretisches Modell zu wählen, das einen unteren Endpunkt besitzt. Hierfür bietet sich die logarithmierte Normalverteilung an.

2.4.3 Logarithmische Normalverteilung

Die logarithmische Normalverteilung ist eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung über der Menge der positiven reellen Zahlen. Ist U eine normalverteilte Zufallsgröße mit Erwartungswert m_U und Standardabweichung σ_U , dann ist die Zufallsgröße X nach Gleichung (2.15) lognormalverteilt.

$$X = \exp(U) \quad (2.15)$$

Wird diese Gleichung nach U aufgelöst und in die Gleichungen der Gauß'schen Normalverteilung eingesetzt, folgen daraus Verteilungsfunktion und Dichte der Lognormal-Verteilung.

$$F_X(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - m_U}{\sigma_U}\right) \quad (2.16)$$

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_U \cdot x} \cdot \varphi\left(\frac{\ln x - m_U}{\sigma_U}\right) \quad (2.17)$$

Gleichung (2.16) ist die ebene Form der Lognormal-Verteilung, der untere Eckpunkt ist $x = 0$. Durch Parallelverschiebung entlang der x-Achse kann eine Verallgemeinerung der Lognormal-Verteilung erreicht werden, die es ermöglicht, die Verteilung sehr gut an vorhandene Stichproben anzupassen. Um dies zu erreichen, wird in den Gleichungen (2.16) und (2.17) x durch $(x-x_0)$ ersetzt, x_0 stellt den gewünschten unteren Eckpunkt dar.

2.4.4 Weibull-Verteilung

Die vereinfachte Weibull-Verteilung für die klassische Lebensdaueranalyse ist eine zweiparametrische, stetige Funktion. Die beiden Parameter sind der sogenannte Formparameter b und der Lageparameter T . Als Formelzeichen der Zufallsvariable wird zumeist t statt x

benutzt, da Weibull-Verteilungen sehr häufig in Zusammenhang mit Lebensdauern verwendet werden. Weibull-Verteilungen sind nur für positive Werte von t definiert. Sie ist im Gegensatz zu Normal- und Lognormal-Verteilung eine Extremwertverteilung, für die die Größtwerte und Kleinstwerte von Zufallsgrößen eine fundamentale Bedeutung haben. Ausführliche Darstellungen und Ableitungen findet man u. a. bei Gumbel (1958).

Wie bereits erwähnt, sind Lebensdaueruntersuchungen die dominierende Anwendung von Weibull-Verteilungen. Die Ausfallwahrscheinlichkeit kann auf grafischem Weg relativ schnell und einfach mit dem Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier ermittelt werden.

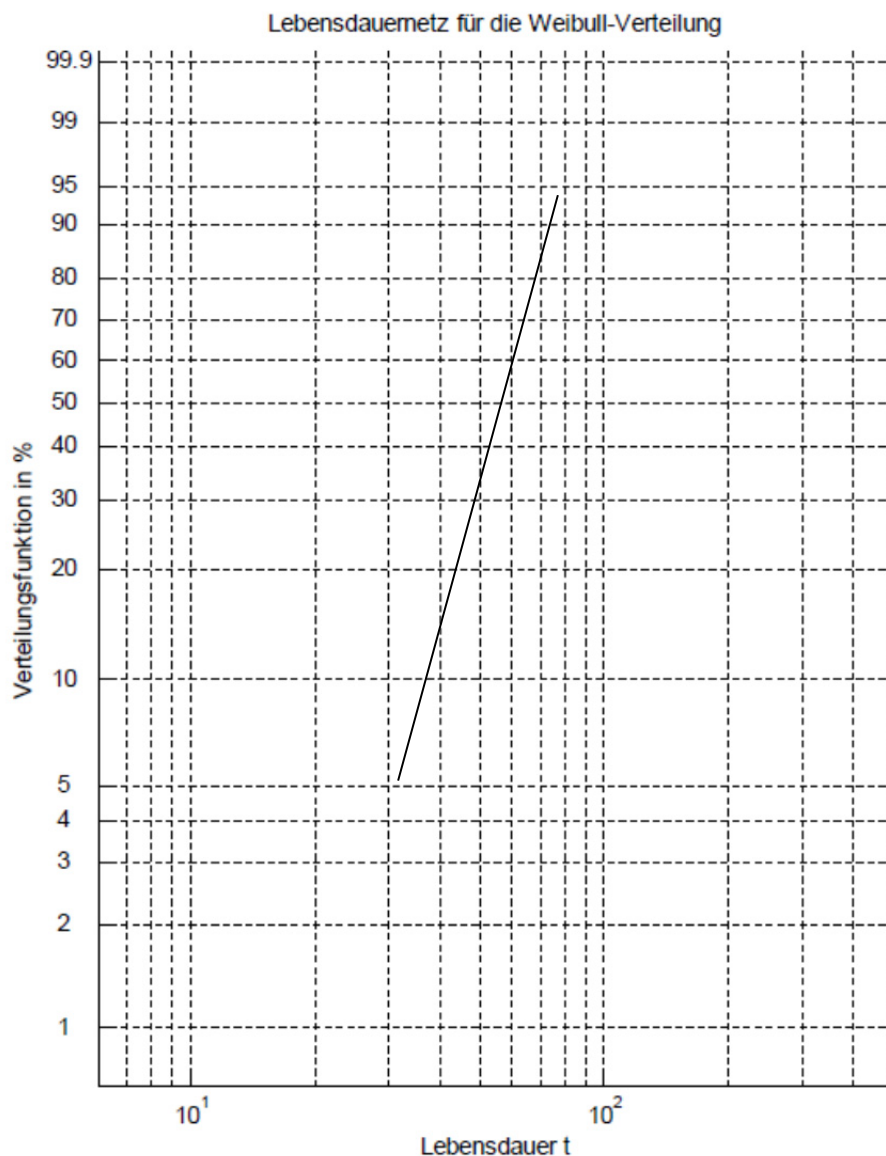


Abbildung 2-1: Beispiel eines Lebensdauernetzes für die Weibullverteilung (Ament (2010))

Auf diesem Papier sind x-Achse und y-Achse logarithmisch skaliert. Dadurch hat die Verteilungsfunktion die Form einer Geraden. Für positive reelle Zahlen lassen sich die

Verteilungs- und Dichtefunktion der Weibull-Verteilung nach Gleichung (2.18) und (2.19) beschreiben:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{T}\right)^b\right) \quad \text{für } t, T, b \geq 0 \quad (2.18)$$

$$f(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad \text{für } t, T, b \geq 0 \quad (2.19)$$

Entsprechend der hauptsächlichen Verwendung der Weibull-Verteilung als Lebensdauer-Verteilung kann der Formparameter b dazu genutzt werden, um zu modellieren, ob Früh- oder Spätausfälle häufiger sind. Wird $b < 1$ gewählt, treten verstärkt Frühausfälle auf, bei $b > 1$ verstärkt Spätausfälle. Der Lageparameter T kann verwendet werden, um die durchschnittliche Lebensdauer zu verändern. Er gibt die charakteristische Lebensdauer bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,2% (= Modalwert) an, die jedoch im Allgemeinen nicht mit der durchschnittlichen Lebensdauer identisch ist.

2.4.5 Mehrdimensionale Zufallsgrößen und Verteilungen

Im Ingenieurwesen treten häufig mehrdimensionale Fragestellungen auf, in denen ein bestimmtes Ereignis von mehreren Zufallsvariablen abhängig ist. In diesem Fall ist die gemeinsame Verteilungsfunktion von Interesse, die sich wie in Gleichung (2.20) ergibt:

$$F_{X,Y}(x, y) = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y f_{X,Y}(u, v) \, du \, dv \quad (2.20)$$

Die gemeinsame Verteilungsdichte erhält man durch Ableitung der Verteilungsfunktion:

$$f_{X,Y}(x, y) = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} F_{X,Y}(x, y) \quad (2.21)$$

Die Eintretenswahrscheinlichkeit für ein bestimmtes Ereignis X unter der Bedingung, dass ein anderes Ereignis Y eingetreten ist, nennt man bedingte Wahrscheinlichkeit nach Gleichung (2.22).

$$f_{X|Y}(x, y) = \frac{f_{X,Y}(x, y)}{f_Y(y)} \quad (2.22)$$

Die zugehörige Verteilungsfunktion erhält man durch Integration der Verteilungsdichte. Die Randverteilung der Zufallsvariablen Y in y -Richtung ergibt sich aus der Integration der gemeinsamen Verteilungsdichte $f_{X,Y}$ über alle x zu:

$$f_Y(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X,Y}(x, y) \, dx \quad (2.23)$$

Für den Fall stochastisch unabhängiger Zufallsvariablen gilt:

$$f_{X|Y}(x, y) = f_X(x) \quad (2.24)$$

$$f_{X,Y}(x, y) = f_X(x) \cdot f_Y(y) \quad (2.25)$$

$$F_{X|Y}(x, y) = F_X(x) \quad (2.26)$$

Stehen die Zufallsvariablen jedoch in einem funktionalen Zusammenhang zueinander, entstehen bei der Berechnung dieser resultierenden Verteilungen häufig komplexe mathematische Ausdrücke, die nur noch mittels numerischer Integration oder Monte-Carlo-Simulation ermittelt werden können.

Für den Fall der Multiplikation zweier Zufallsvariablen $Z = X \cdot Y$ ergibt sich die gemeinsame Dichte zu:

$$f_z(z) = \frac{1}{|y|} \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X,Y}\left(\frac{z}{y}, y\right) dy \quad (2.27)$$

Die entsprechende Verteilungsfunktion erhält man wiederum durch Integration der resultierenden Verteilungsdichten. Im Falle stochastischer Unabhängigkeit der Basisvariablen können gemäß Gleichung (2.25) die gemeinsamen Verteilungsdichten durch die Punkte der Randdichten ersetzt werden. Aus dem zentralen Grenzwertsatz der Statistik ergibt sich sinngemäß, dass das Produkt bzw. der Quotient unabhängiger lognormalverteilter Zufallsvariablen ebenfalls wieder lognormalverteilt sein muss (siehe z.B. Benjamin & Cornell (1970)).

Für Erwartungswert und Varianz ergeben sich entsprechend:

$$E[X \cdot Y] = E[X] \cdot E[Y] \quad (2.28)$$

$$VAR[X \cdot Y] = E[X]^2 \cdot VAR[Y] + E[Y]^2 \cdot VAR[X] + VAR[X] \cdot VAR[Y] \quad (2.29)$$

Stehen die Zufallsvariablen in einem beliebigen allgemeinen Zusammenhang, können die statistischen Momente nur in seltenen Fällen analytisch bestimmt werden. Dies gilt insbesondere, wenn keine abgesicherten Informationen bezüglich der Verteilung der Basisvariablen vorliegen. In diesem Fall wird die Funktion der Zufallsvariablen im Mittelwert in eine Taylorreihe entwickelt, um eine approximative Lösung angeben zu können.

2.4.6 Transformation von Verteilungen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde bereits kurz auf die Vorzüge der Normal- und Lognormalverteilungen eingegangen, die in der Wahrscheinlichkeitstheorie von großer Bedeutung sind. Aus den bekannten Verteilungstypen lassen sich durch geeignete Trans-

formationen neue Verteilungen gewinnen, die in bestimmten Bereichen über die gleichen Auftretenswahrscheinlichkeiten wie die Ausgangsfunktion verfügen. Die einzige Voraussetzung ist, dass zur Ausgangsfunktion eine Umkehrfunktion existiert. Für einen Vektor mit unabhängigen Basisvariablen

$$F_i(x_i) = \Phi(u_i) \quad (2.30)$$

liefert die Umformung:

$$X_i = F_i^{-1}(\Phi(u_i)) \quad (2.31)$$

$$U_i = \Phi^{-1}(F_i(x_i)) \quad (2.32)$$

Für die Transformationsbeziehungen zwischen Normal- und Lognormalverteilung gelten die folgenden Gleichungen (2.33) und (2.34). Ist die Variable X lognormalverteilt mit Mittelwert m_x und Variationskoeffizient V_x , dann ist $\ln(X)$ normalverteilt mit den Parametern m_u und s_u .

$$m_u = \ln(m_x) - 0,5 \cdot \ln(1 + V_x^2) \quad (2.33)$$

$$s_u = \sqrt{\ln(1 + V_x^2)} \quad (2.34)$$

2.5 Anpassung von Daten an Verteilungsfunktionen auf statistischer Basis

2.5.1 Allgemeines

Die probabilistische Modellierung von Basisvariablen wird im Bauwesen häufig nur aufgrund einzelner Schädigungsmechanismen bzw. mechanischer Gegebenheiten durchgeführt. Dazu muss eine genaue Beschreibung des Schädigungsverlaufs vorliegen, um Modelle der Schädigungsmechanismen formulieren zu können (z. B. Gehlen (2000)).

Da die Form der Verteilung einer Zufallsvariablen und die statistischen Momente der Verteilungsfunktion den probabilistischen Charakter einer Zufallsvariablen bestimmen, können in Zweifelsfällen statistische Verfahren bei der Wahl der Verteilungsfunktion hilfreich sein. Üblicherweise sollte die Form der Verteilung aus experimentellen Daten gewonnen werden, was allerdings bei der Anwendung im Bauwesen (v. a. bei Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit von Bauteilen des Ausbaus) aufgrund fehlender Datengrundlagen nur in den seltensten Fällen möglich ist.

2.5.2 Wahrscheinlichkeitspapier und Lebensdauernetz

Die Anpassung einer Verteilungsfunktion an die vorhandene Datenbasis kann unter Verwendung von Wahrscheinlichkeitspapieren auf grafischem Weg erfolgen (siehe u. a. auch Abschnitt 2.4.4). Dabei werden vorliegende Mess- oder Umfragewerte in ein spezielles Diagramm eingetragen, welches an den Werten der gewählten Verteilungsfunktion kalibriert ist. Jede Verteilungsfunktion erfordert daher die Konstruktion eines eigenen Wahrscheinlichkeitspapiers. Auf der Abszisse ist der Wertebereich x der Stichprobe in linearer Einteilung aufgetragen, während auf der Ordinate die gewählte Verteilungsfunktion proportional zu den Werten x aufgetragen wird. Dadurch entsteht eine nichtlineare Transformation auf der Ordinate. Mit dieser Vorgehensweise wird die zugehörige Verteilung als Gerade im Wahrscheinlichkeitspapier abgebildet. Bei Verteilungen, die ins Unendliche streben, gilt dies allerdings nur in bestimmten Teilbereichen (bis ca. $F_X(x) = 10^{-3}$). Im Falle der Lognormalverteilung verwendet man das Wahrscheinlichkeitspapier der Normalverteilung, wobei die Werte auf der Abszisse logarithmisch aufgetragen werden.

Nach Benjamin & Cornell (1970) werden die Werte der Stichprobe (x_1, \dots, x_n) nach ihrer Größe sortiert und anschließend die zugehörige kumulative Verteilung gebildet:

$$F_X(x_i) = \frac{i}{N+1} \text{ mit } N = \text{Stichprobenumfang} \quad (2.35)$$

Sind Extremwerte der Verteilung von Interesse, empfiehlt Schneider (1996) die Verteilungsfunktion:

$$F_X(x_i) = \frac{i - 0,4}{N + 0,2} \text{ mit } N = \text{Stichprobenumfang} \quad (2.36)$$

Mit Hilfe dieser Verteilung werden anschließend die Messwerte als Punkte $(x_i, F_X(x_i))$ in das Wahrscheinlichkeitspapier eingetragen. Je besser diese Einzelwerte auf einer Geraden liegen, umso besser passt sich die Verteilung der Zufallsvariablen der gewählten Verteilung des Wahrscheinlichkeitspapiers an. Es sollte beachtet werden, dass die Stichprobengröße eine entscheidende Rolle spielt, da erst ab einem Umfang von ca. 30 Werten eine Aussage bezüglich des Wahrscheinlichkeitspapiers möglich ist (Devore (2001)). Für die praktische Anwendung stehen in der Fachliteratur (z. B. Schneider (1996)) spezielle Wahrscheinlichkeitspapiere für die wichtigsten Verteilungstypen zur Verfügung. Für die Prognose von Lebensdauern ist die Arbeit von Steinecke (1979) zu nennen. Das darin beschriebene Lebensdauernetz ist ein Wahrscheinlichkeitspapier für die im Rahmen der Lebensdauervorhersage häufig verwendete Weibull-Verteilung, die im weiteren Verlauf der Arbeit jedoch nicht weiter verwendet wird. Steinecke (1979) selbst schreibt in seiner Arbeit, dass bei analytischen Überlegungen die logarithmische Normalverteilung den

deutlich besseren Ansatz liefert als die Annahme einer einparametrischen Weibull-Verteilung.

2.5.3 Methode der Minimierung der Fehlerquadrate

Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (von C. F. Gauß) ist in der Statistik weit verbreitet, da sie sowohl zur Approximation von Verteilungen als auch zur Anpassung von Daten an eine Regressionslösung oder ähnliche Problemstellungen anwendbar ist. Bei dieser Methode werden die Daten derart an ein gewähltes stochastisches Modell angepasst, dass die Summe der Quadrate der Abweichungen zwischen Stichprobe und gewähltem Modell minimal wird. Möchte man z. B. eine bekannte Verteilung F_X an die empirische Verteilung F_0 einer vorhandenen Stichprobe von Versuchsergebnissen annähern, wird die Summe der Quadrate der Abweichungen Δ (auch Fehlerquadrate genannt) zwischen der vorhandenen und der gewählten Verteilung minimiert. Zu diesem Zweck werden die in das Modell eingehenden statistischen Parameter der gewählten Verteilung entsprechend oft variiert.

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \left(F_0(x_i) - F_X(x_i) \right)^2 = \text{Min.} \quad (2.37)$$

Darüber hinaus ist es möglich, bestimmte Werte zu wichten, wenn sie zur Beschreibung des statistischen Modells von höherer bzw. untergeordneter Priorität sind als andere Werte. Dies ist besonders effizient, um Ausreißer einer Stichprobe bei der Modellanpassung zu berücksichtigen. Dazu wird Gleichung (2.37) um einen Vektor aus Wichtungsfaktoren $w(w_1, \dots, w_n)$ modifiziert.

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \vec{w} \cdot \left(F_0(x_i) - F_X(x_i) \right)^2 = \text{Min.} \quad (2.38)$$

Sind die Streuungen von Einzelwerten bekannt, ist es sinnvoll, Werte mit kleiner Streuung stärker zu gewichten als Werte mit großer Streubreite. Die Wichtungsfaktoren können beliebig festgelegt werden, wobei es häufig von Vorteil ist, die Faktoren derart festzulegen, dass ihre Summe 1 ergibt.

2.6 Parameterschätzung anhand von Basisdaten

2.6.1 Allgemeines

Jedes Ingenieurmodell basiert auf Basisvariablen, deren statistisches Modell in der Regel aus experimentellen Untersuchungen, oder wie im vorliegenden Fall aus Datenerhebungen, ermittelt werden müssen. Für eine probabilistische Analyse müssen zunächst die statistischen Parameter bestimmt werden, da es sich bei diesen Variablen ebenfalls um

Zufallsvariablen handelt, die signifikant vom Stichprobenumfang abhängen. In diesem Zusammenhang spricht man von Parameterschätzung. Die geschätzten Parameter konvergieren erst mit steigendem Stichprobenumfang ($n \rightarrow \infty$) gegen die wahren statistischen Größen und erlauben einen Rückschluss auf die Verteilung der Grundgesamtheit. Zur Schätzung der Parameter stehen verschiedene mathematische Verfahren zur Verfügung, wovon einige im Folgenden kurz dargestellt werden. Die Güte der Schätzungen kann bei Bedarf durch statistische Testverfahren verifiziert werden.

2.6.2 Momentenmethode

Die Momentenmethode ist die älteste bekannte Methode zur Bestimmung von unbekannten Parametern. Bei diesem Verfahren werden die ersten beiden statistischen Momente auf Basis von nur einer vorhandenen Stichprobe geschätzt. Die Schätzwerte \bar{x} für den Mittelwert m_X und s^2 für die Varianz σ_X^2 können auf Grundlage der vorhandenen Stichprobe nach Benjamin & Cornell (1970) folgendermaßen berechnet werden:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = m_X \quad (2.39)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.40)$$

Da sich die berechneten bzw. geschätzten Momente in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs ändern, stellt sich die Frage, wie vertrauenswürdig die Schätzungen für den Mittelwert und die Varianz wirklich sind. Zu diesem Zweck wird in der Statistik das Konfidenzintervall verwendet, das die Schwankungsbreite des Parameters in Abhängigkeit einer vorgegebenen Aussagesicherheit angibt. Bei bekannter Standardabweichung kann für den normalverteilten Mittelwert das Konfidenzintervall mit einer Aussagewahrscheinlichkeit $P = 1 - \alpha$ wie folgt berechnet werden:

$$P \left[\bar{x} - \frac{\sigma_X \cdot k_{\alpha/2}}{\sqrt{n}} < m_X < \bar{x} + \frac{\sigma_X \cdot k_{\alpha/2}}{\sqrt{n}} \right] = 1 - \alpha \text{ und } k_{\alpha/2} = \Phi^{-1} \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (2.41)$$

Der Wertebereich des Konfidenzintervalls ist signifikant vom Stichprobenumfang n und der Aussagewahrscheinlichkeit abhängig, wobei die Schwankungsbreite durch zusätzliche Basisdaten erheblich verringert werden kann. Im Bauwesen wird die Aussagewahrscheinlichkeit häufig zu 95% ($\alpha = 0,05$) gewählt (vgl. z. B. DIN EN 1990 (2002)).

Das Konfidenzintervall für den normalverteilten Mittelwert mit unbekannter Standardabweichung ergibt sich nach Gleichung (2.42).

$$P\left[\bar{x} - \frac{s \cdot t_{\alpha/2;n-1}}{\sqrt{n}} < m_X < \bar{x} + \frac{s \cdot t_{\alpha/2;n-1}}{\sqrt{n}}\right] = 1 - \alpha \quad (2.42)$$

Der entsprechende Wert der t -Verteilung mit Freiheitsgrad $n-1$ wird mit $t_{\alpha/2;n-1}$ bezeichnet.

Die Abgrenzung zwischen bekannter und unbekannter Standardabweichung ergibt sich aus dem Vergleich der beiden Ansätze. Demnach ist die Streuung der unbekannten Standardabweichung bei der Bestimmung des Mittelwerts, ab einem Stichprobenumfang von etwa 25 unabhängigen Einzelwerten vernachlässigbar (Benjamin & Cornell (1970)).

Das Konfidenzintervall für die normalverteilte Standardabweichung kann gemäß Kühlmeyer (2001) wie folgt ermittelt werden:

$$P\left[s \cdot \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi^2_{1-(\alpha/2);n-1}}} < \sigma_X < s \cdot \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi^2_{\alpha/2;n-1}}}\right] = 1 - \alpha \quad (2.43)$$

Dabei bezeichnet $\chi^2_{1-(\alpha/2);n-1}$ bzw. $\chi^2_{\alpha/2;n-1}$ jeweils den entsprechenden Wert der χ^2 -Verteilung mit Freiheitsgrad $n-1$. Für die Praxis ist meistens nur der obere Grenzwert relevant.

2.6.3 Maximum-Likelihood-Prinzip

Im Gegensatz zur Momentenmethode ist es mithilfe der Maximum-Likelihood-Methode möglich, für eine beliebige differenzierbare Verteilung direkt die Parameter der gewählten Verteilungsfunktion zu schätzen. Im Kern geht es bei der Maximum-Likelihood-Methode einfach darum, welche Parameterwerte λ das Zustandekommen dieser konkreten Stichprobe „am wahrscheinlichsten“ machen. Für eine Stichprobe mit n unabhängigen Zufallsvariablen lässt sich die gemeinsame Dichte dieser Stichprobe unter Berücksichtigung der unbekannten Parameter λ der Dichtefunktion δ wie folgt berechnen:

$$L = \delta(x_1 | \lambda_1, \dots, \lambda_i) \cdot \dots \cdot \delta(x_n | \lambda_1, \dots, \lambda_i) \quad (2.44)$$

Diese Funktion wird Likelihood-Funktion L genannt. Die gesuchten Parameter haben die maximale Auftretenswahrscheinlichkeit, wenn die Likelihood-Funktion extremal wird. Da Logarithmieren eine monotone Transformation ist, kann ebenso gut der Logarithmus der Likelihood-Funktion, die sogenannte Log-Likelihood-Funktion, maximiert werden, was den Berechnungsaufwand in den meisten Fällen deutlich verringert. Durch partielles Differenzieren und Null setzen der Log-Likelihood-Funktion, erhält man schließlich das Gleichungssystem zur Bestimmung der gesuchten Parameter, die man Maximum-Likelihood-Schätzer der gesuchten Parameter nennt. Mithilfe der ermittelten Parameter lassen sich dann z. B. die statistischen Momente der Verteilung berechnen. Die Maximum-Likelihood-Methode hat gegenüber der Momentenmethode den besonderen Vorteil,

dass man mit ihr direkt die Varianzen und Kovarianzen¹ der geschätzten Parameter in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs berechnen kann, was insbesondere im Falle eines geringen Stichprobenumfangs wichtig für die Zuverlässigkeit der geschätzten Einflussgrößen ist. Zur Bestimmung der Streuung muss die Fisher-Matrix H nach Gleichung (2.45) berechnet und deren Inverse gebildet werden, um die sogenannte Varianz-Kovarianzmatrix C_λ zu erhalten. Aus Übersichtsgründen ist nur der zweidimensionale Fall dargestellt.

$$H = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \lambda_i^2} & -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \lambda_i \partial \lambda_k} \\ -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \lambda_i \partial \lambda_k} & -\frac{\partial^2 \ln L}{\partial \lambda_k^2} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$C_\lambda = H(\lambda)^{-1} \quad (2.46)$$

Die Auswertung der Matrix (2.45) liefert letztlich die gesuchten Varianzen bzw. Kovarianzen. Das Vorgehen soll am Beispiel der Normalverteilung erklärt werden. Die Likelihood-Dichte mit den unbekannten Parametern s und m bei Annahme einer Normalverteilung lautet:

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot s} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x_i - m}{s}\right)^2\right) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot s}\right)^n \cdot \exp\left(-\frac{1}{2 \cdot s^2} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2\right) \quad (2.47)$$

Durch Logarithmierung erhält man die Log-Likelihood-Funktion:

$$\ln L = -\frac{n}{2} \cdot \ln(2\pi) - n \cdot \ln s - \frac{1}{2 \cdot s^2} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \quad (2.48)$$

Das Maximum dieser Funktion kann wie üblich bestimmt werden, indem man die ersten Ableitungen der Log-Likelihood-Funktion zu Null setzt und nach den unbekannten Parameterwerten s und m auflöst. Der Maximum-Likelihood-Schätzer für s und m ergibt sich zu:

$$\frac{\partial \ln L}{\partial s} = -\frac{n}{s} + \frac{1}{s^3} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 = 0 \quad (2.49)$$

¹ Die Kovarianz ist in der Statistik eine Maßzahl für den Zusammenhang zweier statistischer Zufallsvariablen. Sie lässt sich z. B. darstellen als $Cov(X, Y) = E(X \cdot Y) - E(X) \cdot E(Y)$.

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 = ns^2 \Rightarrow \hat{s}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}{n} \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial m} = \frac{1}{s^2} \cdot \left(-n \cdot m + \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (2.51)$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^n x_i = n \cdot m \Rightarrow \hat{m} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{m} \quad (2.52)$$

Der Maximum-Likelihood-Schätzer für den „wahren“ Parameter m liefert also wieder den Mittelwert \bar{m} , der nicht von der Varianz s^2 abhängt, obwohl die Likelihood-Funktion dies tut. Wichtig ist, dass unterschiedliche Stichproben zu verschiedenen Log-Likelihood-Funktionen führen, da die Log-Likelihood-Funktion eine Funktion der Stichprobendaten ist (siehe Gleichung (2.48)). Nach Stocker (2010) ist die Log-Likelihood-Funktion umso flacher, je größer die Varianz der Stichprobe ist. Somit werden die Schätzungen störanfälliger, wenn die Log-Likelihood-Funktion sehr flach ist.

Die Elemente der Fisher-Matrix lauten schließlich:

$$\frac{\partial^2 \ln L}{\partial s^2} = \frac{n}{s^2} - \frac{3}{s^4} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \quad (2.53)$$

$$\frac{\partial^2 \ln L}{\partial m^2} = -\frac{n}{s^2} \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial^2 \ln L}{\partial s \partial m} = \frac{2}{s^3} \cdot \left(n \cdot m - \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (2.55)$$

2.6.4 Data Updating nach Bayes

Häufig können bei einer Schätzung von Parametern Vorinformationen verwendet werden, die den Stichprobenumfang virtuell vergrößern. Gängige Beispiele für diese Art von so genannten Priorinformationen sind Versuchsergebnisse aus anderen Quellen, Expertenbefragungen oder eigene Erfahrungswerte. Die im Vorfeld auf dieser Grundlage geschätzten Parameter können dann beispielsweise mithilfe von experimentellen Ergebnissen oder weiteren Expertenaussagen zugeschräfft werden. Diese Methode der Parameterschätzung ist unter dem Begriff des „Data Updating“ bekannt, dessen Grundlage das von Thomas Bayes entwickelte Theorem darstellt. Im Gegensatz zur klassischen Statistik geht die Bayestheorie davon aus, dass die Parameter θ_i einer Verteilung keine konstanten Werte sind, sondern vielmehr selbst Zufallsvariablen darstellen, welche mit einer bestimmten

Wahrscheinlichkeit als zutreffend angesehen werden. Daher stellt die Schätzung der Parameter immer eine bedingte Wahrscheinlichkeit $P(\theta|x)$ dar. Für den Fall, dass genügend viele Daten zur Bestimmung der unbekannten Parameter vorliegen würden, wäre die Unsicherheit vernachlässigbar klein und die entsprechenden Parameter θ_i würden konstante Werte annehmen.

Die geschätzten Prior-Parameter unterliegen ihrerseits wiederum einer statistischen Verteilung, welche mithilfe neuer Daten präzisiert werden kann, wie in Abbildung 2-2 dargestellt ist. In diesem Beispiel ist die Verteilung eines lognormalverteilten Mittelwertes der Lebensdauer einer zweischaligen Außenwandkonstruktion vor und nach dem Update abgebildet. Es zeigt sich, dass sowohl die Größe des Mittelwerts als auch die Streuung der Posterioridichte signifikant durch das Updaten verbessert wurde. Dabei sollte angemerkt werden, dass Prior- und Posterioridichte nicht immer demselben Verteilungstyp entsprechen.

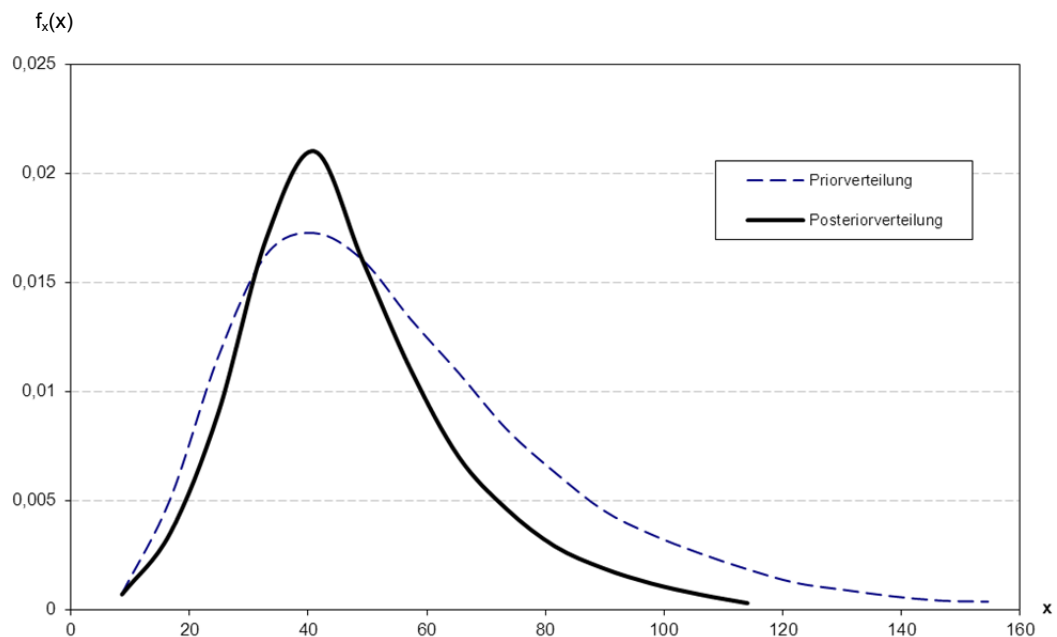


Abbildung 2-2: Prinzip des Daten-Updating am Beispiel eines lognormalverteilten Mittelwertes

Neben der Zuschärfung von Parametern ist es auch möglich, die Verteilung der Zufallsvariablen zu präzisieren. Eine ausführliche Darstellung der Thematik findet sich bei Raiffa & Schlaifer (1961) oder Box & Tiao (1992). Das mathematische Vorgehen für das Updaten von statistischen Parametern wird im Folgenden kurz erläutert.

Unter Verwendung des Theorems von Bayes ergibt sich für die Verteilung einer von θ abhängigen Zufallsvariablen $f_X(x|\theta)$, mit der Priordichte $f_\theta(\theta)$ des zugehörigen Parametervektors θ und der Posterioridichte $f_\theta(\theta|x)$ des Parametervektors, folgender funktionaler Zusammenhang:

$$f_{\theta}(\theta|x) = \frac{f_X(x|\theta) \cdot f_{\theta}(\theta)}{f_X(x)} = \frac{f_X(x|\theta) \cdot f_{\theta}(\theta)}{\int f_X(x|\theta) \cdot f_{\theta}(\theta) d\theta} \quad (2.56)$$

Die Integration erfolgt dabei über den Wertebereich von θ . Die Dichtefunktion $f_X(x)$, die ebenfalls unbekannt ist, bezeichnet die Dichte von $f_X(x|\theta)$ ohne den Einfluss der Streuung der Parameter θ . Die Dichte $f_X(x|\theta)$ ergibt sich dabei aus der Likelihood-Funktion der gemessenen Daten. Für unkorrelierte Daten gilt:

$$f_X(x|\theta) = f_X(x_1|\theta) \cdot \dots \cdot f_X(x_n|\theta) = \prod_{i=1}^n f_X(x_i|\theta) = L(\theta|x) \quad (2.57)$$

Das Integral in Gleichung (2.56) kann als ein konstanter Faktor angesehen werden, welcher dafür sorgt, dass die Fläche unter der Verteilungsdichte den Wert 1 annimmt und somit $f_{\theta}(\theta|x)$ zu einer wirklichen Verteilungsdichte wird. Damit erhält man die häufig benutzte Kurzform der Posterioridichte unter Verwendung des Bayes'schen Theorems I. Ordnung (one stage Bayes).

$$f_{\theta}(\theta|x) = k \cdot L(\theta|x) \cdot f_{\theta}(\theta) \quad (2.58)$$

Der Updateprozess kann beliebig oft hintereinander ausgeführt werden, wobei die Posterioridichte des letzten Schritts als Priordichte des neuen Prozesses dient. Dies ist insofern interessant, da mithilfe von neu erhaltenen Daten die Abschätzung stetig verbessert werden kann. Mit steigendem Stichprobenumfang nähert sich gemäß Benjamin & Cornell (1970) die Verteilung der unbekannten Parameter der Likelihood-Funktion und die Bayes'sche Verteilung der wahren Verteilung von X an. Man kann sagen, dass die Priorverteilung und die Likelihood-Funktion ihrer Aussagesignifikanz entsprechend gewichtet werden. Eine Priorverteilung mit kleiner Standardabweichung wird daher durch die Multiplikation mit der Likelihood-Funktion kaum verbessert, weshalb das Updaten besonders effektiv ist, wenn nur wenige Vorinformationen vorliegen und die zu schätzenden Parameter über eine große Streuung verfügen.

Für den wichtigen Fall von normalverteilten Eingangsgrößen ist eine mathematisch geschlossene Lösung des Problems möglich. Dabei wird für eine normalverteilte Dichte der Basisvariablen X mit unbekanntem Mittelwert und unbekannter Varianz als Priorverteilung eine Gamma-Normal-Verteilung gemäß Gleichung (2.59) gewählt, da in diesem besonderen Fall die Priordichte der Posterioridichte entspricht (vgl. RCP (2004)).

$$f_{M,\Sigma}(\mu, \sigma) = \frac{\sqrt{n}}{\sigma \cdot \sqrt{2n}} \cdot \exp\left[-\frac{n}{2} \left(\frac{\mu - m}{\sigma}\right)^2\right] \cdot \frac{\left(\frac{v}{2}\right)^{v/2} \cdot \frac{2}{s} \cdot \left(\frac{s^2}{\sigma^2}\right)^{\frac{v+1}{2}}}{\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)} \cdot \exp\left(-\frac{v \cdot s^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (2.59)$$

Die Posterior-Parameter lauten:

$$n'' = n + n' \quad (2.60)$$

$$m'' = \frac{n \cdot m + n' \cdot m'}{n''} \quad (2.61)$$

$$v'' = v' + \delta(n') + v + \delta(n) - \delta(n'') \quad (2.62)$$

$$s''^2 = \frac{v' \cdot s'^2 + n' \cdot m'^2 + v \cdot s^2 + n \cdot m^2 - n'' \cdot m''^2}{v''} \quad (2.63)$$

mit

$$v = n - 1; \delta(n') = 0 \text{ für } n' = 0; \text{ sonst } \delta(n') = 1; \text{ analog für } n, n''$$

Neben der Berücksichtigung von direkten Messwerten ist es auch möglich, mit dem dargestellten Verfahren auf Vorinformationen (m_i, s_i) von früheren Untersuchungen oder sonstigen Experteneinschätzungen zurückzugreifen. Dazu müssen die gegebenen Informationen anhand der folgenden Gleichungen von Rackwitz (1982) in äquivalente Stichprobengrößen (n', v', s', m') der Gamma-Normalverteilung umgerechnet werden. Der funktionale Zusammenhang $v' = n' - 1$ verliert dabei seine Gültigkeit.

$$\bar{h} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{1}{s_i^2}; \hat{h} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{s_i^2}; \tilde{h} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \ln\left(\frac{1}{s_i^2}\right); h = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{m_i^2}{s_i^2} \quad (2.64)$$

$$m' = \frac{\hat{h}}{\bar{h}} \quad (2.65)$$

$$s' = \frac{1}{\sqrt{\bar{h}}} \quad (2.66)$$

$$n' = \left(h - \frac{\hat{h}^2}{\bar{h}} \right)^{-1} \quad (2.67)$$

$$v' = \frac{1}{\ln(\bar{h}) - \tilde{h}} \quad (2.68)$$

Die Bayes-Dichte der zuvor normalverteilten Zufallsvariable X , folgt einer modifizierten t -Verteilung nach Rackwitz (1981) gemäß Gleichung (2.69).

$$f_Y(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot v''}} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{v''+1}{2}\right)}{s'' \cdot \sqrt{\frac{n''+1}{n''}} \cdot \Gamma\left(\frac{v''}{2}\right)} \cdot \left[1 + \frac{t^2}{v''}\right]^{\frac{v''+1}{2}} \quad \text{mit } t = \frac{y - m''}{s''} \cdot \sqrt{\frac{n''}{n''+1}} \quad (2.69)$$

Die t -Verteilung konvergiert für hinreichend große Stichproben n gegen die Normalverteilung, so dass in vielen praktischen Fällen die Bayes-Verteilung durch eine Normalverteilung approximiert werden kann.

Zufallsvariablen auf der Material- bzw. Bauteilseite werden in der Regel lognormalverteilt definiert, um negative Bemessungswerte auszuschließen. Eine Anwendung der Gleichungen (2.59) bis (2.69) ist trotzdem möglich, wenn die Eingangsgrößen in normalverteilte Variablen transformiert werden. Verwendet man zur Beschreibung der Lognormalverteilung den Mittelwert m_x und den Variationskoeffizient V_x , dann sind die Größen m_u und s_u normalverteilt (siehe Gleichungen (2.33) und (2.34)).

Ersetzt man nun die Parameter m bzw. m' und s bzw. s' durch m_u und s_u , können die Gleichungen (2.59) bis (2.69) für das Updating von m_u und s_u verwendet werden. Allerdings ergibt sich unter diesen Voraussetzungen als Bayes-Verteilung eine *Log-t*-Verteilung, so dass man bei der Berechnung von t (Gleichung (2.69)) die Variable y durch $\ln(y)$ ersetzen muss. Diese Verteilung kann jedoch für Stichproben mit $n'' > 10$ und $v'' > 10$ hinreichend genau durch eine Lognormalverteilung mit den Parametern gemäß Gleichung (2.70) und (2.71) approximiert werden (vgl. JCSS (2003)).

$$m_u = m''_u \quad (2.70)$$

$$s_u = s''_u \cdot \sqrt{\frac{n''}{n''-1} \cdot \frac{v''}{v''-2}} \quad (2.71)$$

Die gesuchten Größen m_x und V_x der Lognormalverteilung können anschließend durch Rücktransformation berechnet werden.

$$m_x = \exp\left(m_u - 0,5 \cdot s_u^2\right) \quad (2.72)$$

$$V_x = \sqrt{\exp\left(s_u^2\right) - 1} \quad (2.73)$$

Somit ist es mit den angegebenen Gleichungen möglich, die statistischen Momente unter Einbeziehung von Vorinformationen verschiedener Art zu schätzen.

2.7 Lösungsverfahren der Zuverlässigkeitstheorie

2.7.1 Allgemeines

In den vorangegangenen Kapiteln wurde dargestellt, dass das Rechnen mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen oftmals zu komplizierten Integralen führt, die nur selten analytisch lösbar sind. Zwei Verfahren zur Berechnung der theoretischen Ausfallwahrscheinlichkeit werden in den folgenden Abschnitten erläutert: Die Momentenmethode („First Order Second Moment Method“) als vereinfachte Näherungslösung und die Monte-Carlo-Methode als mathematisch exaktes Verfahren.

2.7.2 Momentenmethode (FOSM)

Wenn nur wenige Informationen, z. B. nur die Erwartungswerte und Varianzen der eingehenden Basisvariablen vorliegen, bietet sich die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit mithilfe der so genannten Momentenmethode (FOSM) an, da bei diesem Näherungsverfahren keine Aussagen über die Verteilungsfunktion der Basisvariablen benötigt werden. Aus rechentechnischen Gründen und unabhängig von deren wirklicher Verteilung wird den Variablen vereinfacht eine Normalverteilung unterstellt (Stewart & Melchers (1997)). Weiterhin wird eine lineare Grenzzustandsfunktion verwendet, wobei ggf. nichtlineare Funktionen in lineare Grenzzustandsfunktionen transformiert werden.

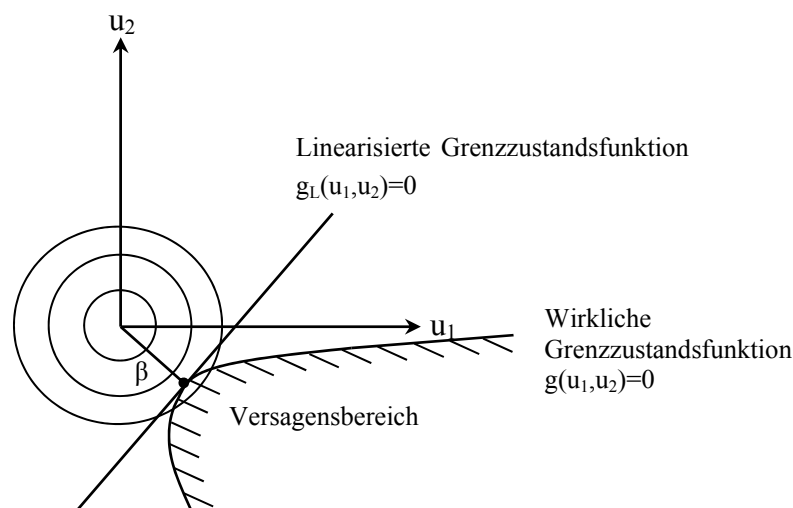


Abbildung 2-3: Nichtlineare und linearisierte Grenzzustandsfunktion im Standardnormalraum (Hasofer & Lind (1974))

Zu diesem Zweck wird die Grenzzustandsfunktion in eine Taylorreihe entwickelt, von der nur das erste Glied für die weitere Berechnung verwendet wird (First Order). Um die Genauigkeit der Wahrscheinlichkeitsberechnung zu steigern, wird die Taylorreihe dabei im Versagenspunkt $u^* (u_1, \dots, u_n)$, welcher daher iterativ bestimmt werden muss, entwickelt.

Bildlich gesprochen wird die Tangentialebene an die Grenzzustandsfunktion im Versagenspunkt angenähert. Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Bauteilzuverlässigkeit findet im Standardnormalraum statt, in den alle Variablen zuvor transformiert werden. Der Zuverlässigkeitsindex β z. B. nach Hasofer & Lind (1974) ist als kürzester Abstand vom Koordinatenursprung zum Versagenspunkt definiert. Er wurde als Zielwert für die Zuverlässigkeit in das Sicherheitskonzept der Bemessungsnormen aufgenommen (z.B. DIN 1055-100 (2001)).

Der resultierende Fehler bei der Anwendung dieser einfachen Methode wird umso größer, je näher sich die Grenzzustandsfunktion am Koordinatenursprung befindet, d. h. je größer die Versagenswahrscheinlichkeit ist. Des Weiteren weichen die Ergebnisse stärker von den exakten Werten ab, wenn die Verteilung einer oder mehrerer Basisvariablen signifikant von der Normalverteilung abweicht.

2.7.3 Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Methode beschreibt, im Gegensatz zu den Näherungslösungen der Zuverlässigkeitstheorie I. und II. Ordnung, ein mathematisch exaktes Verfahren zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit. Mittels stochastischer Simulation der Basisvariablen wird die Versagenswahrscheinlichkeit durch Zufallszahlen direkt aus der Grenzzustandsfunktion im Originalraum berechnet, wobei sich das Ergebnis mit wachsender Anzahl N der Simulationen ($N \rightarrow \infty$) dem exakten Resultat annähert. Der Nachteil des Verfahrens liegt im Berechnungsaufwand, der überproportional mit der Variablenanzahl zunimmt.

Die Versagenswahrscheinlichkeit bei der Monte-Carlo-Simulation ergibt sich aus der Anzahl der simulierten Versagensereignisse x , bezogen auf die Gesamtanzahl der Simulationen N :

$$P_F = \frac{x}{N} \quad (2.74)$$

Um den Variationskoeffizienten der Schätzung zu berechnen, kann man nach Rackwitz (2004) eine Analogie zum Bernoulli-Experiment benutzen:

$$V(P_F) \approx \frac{1}{\sqrt{N \cdot P_F}} \quad (2.75)$$

Gleichung (2.75) verdeutlicht die Problematik der Monte-Carlo-Methode. Obwohl die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit theoretisch einfach ist, wird eine sehr große Simulationsanzahl N ($N \gg 1/P_F$) benötigt, um einen vertrauenswürdigen Schätzwert mit kleinem Variationskoeffizienten und somit angemessenem Konfidenzintervall berechnen zu können. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass die Versagenswahrscheinlichkeit im

konstruktiven Bauwesen sehr klein ist (z. B. $P_F = 10^{-6}$) und somit eine sehr große Simulationszahl erfordert. Für die Bauteile des Ausbaus muss die Versagenswahrscheinlichkeit nicht derart klein sein, so dass mit der aktuellen Rechnerkapazität durchaus schnelle und effiziente Rechenzeiten möglich sind. Auf das Festlegen von Zielzuverlässigkeiten wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da der Schwerpunkt nicht auf die Versagensarten oder Versagenswahrscheinlichkeiten gelegt wird, sondern auf eine Quantifizierung möglicher Schadensmechanismen.

2.8 Zusammenfassung

Das vorliegende Kapitel gibt einen kurzen Einblick in die Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie im Bauwesen. Nach einer kurzen Darstellung der Grundlagen zu Versagenswahrscheinlichkeiten und Grenzzuständen wird in Kapitel 2.4 ein erster Schwerpunkt auf die Zufallsvariablen und ihre Verteilungen gelegt. Diese Zufallsgrößen folgen bestimmten Verteilungen, von denen vor allem die Familie der Normalverteilungen hier zu nennen ist. In den Abschnitten 2.5 und 2.6 wird der Umgang mit Expertendaten aus Umfragen in Bezug auf die Entwicklung einer möglichst validierten Datenbasis vorbereitet. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie gewonnene Daten die Form von Verteilungsfunktionen beeinflussen und diese Verteilungen an die jeweiligen Daten angepasst werden können. Die auf dieser Grundlage geschätzten Parameter können anschließend mithilfe von Expertenaussagen zugeshärft werden. Diese Methode der Parameterschätzung ist unter dem Begriff des „Data Updating“ von Thomas Bayes bekannt. Im Gegensatz zur klassischen Statistik geht die Bayestheorie davon aus, dass die Parameter θ_i einer Verteilung keine konstanten Werte sind, sondern vielmehr selbst Zufallsvariablen darstellen, welche mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit als zutreffend angesehen werden. Durch die Berücksichtigung der neuen Expertenaussagen können diese geschätzten Prior-Parameter auf der Basis der Bayestheorie präzisiert und einer Näherungslösung mit großer Stichprobe angenähert werden. Die Datenaktualisierung nach Bayes ist einer der wesentlichsten Schritte zur Schaffung einer zuverlässigen Datenbasis in dieser Arbeit. Abschnitt 2.7 beschreibt anschließend beispielhaft zwei Lösungsverfahren der Zuverlässigkeitstheorie, mit denen die häufig sehr komplexen Berechnungsmodelle gelöst werden können.

3 GRUNDLAGEN DER LEBENSDAUERANALYSE

3.1 Einführung

Der Weg eines Gebäudes von der ersten Planungsidee bis zu seinem Rückbau wird durch unterschiedliche Entwicklungsphasen charakterisiert. Die Gesamtheit dieser Entwicklungsphasen wird als Lebenszyklus bezeichnet.

Die Differenzierung des Lebenszyklus in einzelne Lebensabschnitte erfolgt in der Literatur in unterschiedlicher Form und Detaillierungstiefe. Gemäß Abbildung 3-1 lässt er sich grob in die Phasen Bauwerkserstellung, Bauwerksnutzung und Bauwerksbeseitigung unterteilen.

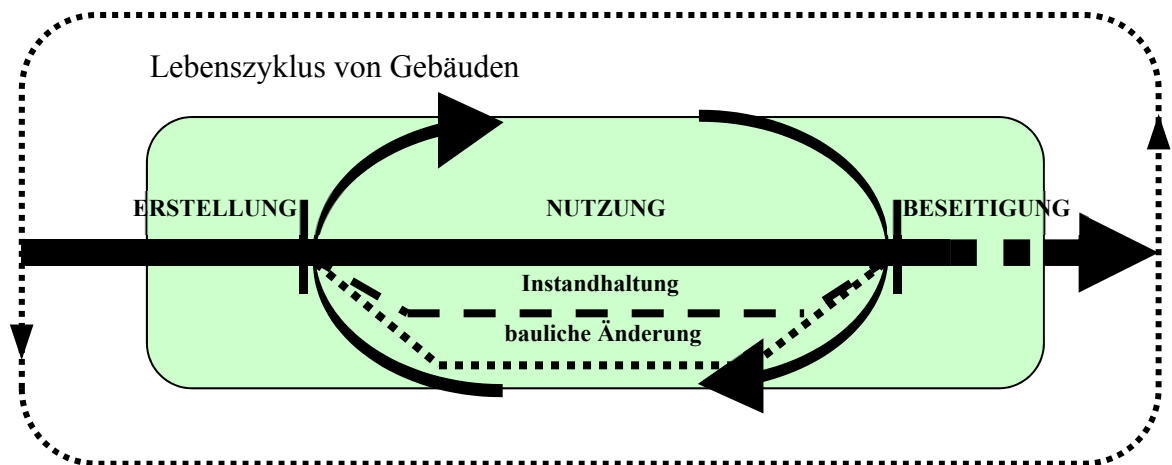


Abbildung 3-1: Lebenszyklus eines Gebäudes nach Herzog (2005)

Eine etwas feinere Unterteilung bietet unter anderem das Phasenmodell des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS (2009)). Dort werden die Lebenszyklusphasen in Planungsphase, Errichtungsphase, Nutzungs- und Betriebsphase, Instandhaltungs- und Modernisierungsphase, Umnutzungs- bzw. Weiternutzungsphase, Rückbau und Wiederverwendung sowie Recycling eingeteilt. Für eine Übersicht der Grundlagen ist die Darstellung gemäß Abbildung 3-1 jedoch vollkommen ausreichend.

Mit der ersten Projektidee startet die Phase der Bauwerkserstellung. Sie reicht von der Planung, inklusive dem notwendigen Grundstückserwerb und der Herstellung des Bauwerks bis zur Übergabe an den Nutzer oder Bauherrn. Diese Phase beinhaltet die Umsetzung des geplanten Werks in ein reales Objekt. Die anschließende Phase der Bauwerksnutzung beginnt mit der Übergabe an den Bauherrn oder Nutzer und endet mit der Beseitigung des Bauwerks. Sie stellt die längste Phase im Lebenszyklus dar und ist gleichzeitig die energieintensivste Phase, da der Betrieb im Gebäude aufrechtzuerhalten ist. Dazu gehört die Versorgung des Gebäudes mit Wasser, Strom, Kälte, Wärme und Energie sowie facilitären Dienstleistungen zur Sicherstellung des Betriebs und des Wohlbefindens der

Nutzer. Die Baukonstruktion und die technische Gebäudeausrüstung sind in dieser Phase durch Instandhaltungsmaßnahmen funktionsfähig zu halten. Bauteile und Bauelemente werden, soweit möglich, instand gehalten und mit Erreichen ihrer wirtschaftlichen oder technischen Lebensdauer ausgetauscht. Instandhaltungsmaßnahmen nach DIN 31051 (2003) sind „Maßnahmen (...) zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustands oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen.“ Sie stellen Unterhaltungsleistungen dar und beinhalten:

- Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats (Wartung)
- Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustands einer Betrachtungseinheit (Inspektion)
- Maßnahmen zur Rückführung einer Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand ohne technische Verbesserung (Instandsetzung)
- Kombination aller Maßnahmen zur Steigerung der Funktionssicherheit einer Betrachtungseinheit, ohne die von ihr geforderte Funktion zu ändern (Verbesserung)

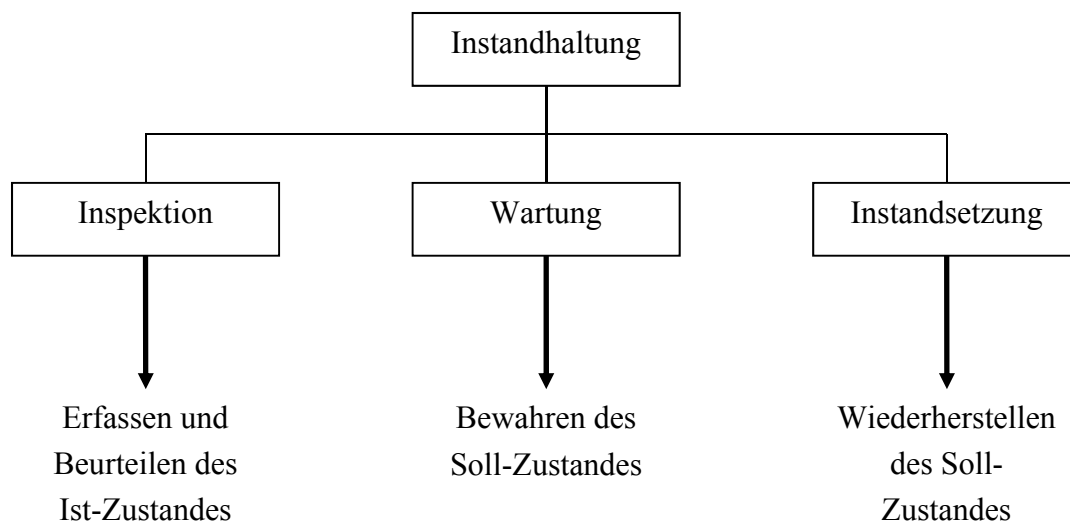


Abbildung 3-2: Gliederung der Instandhaltung nach DIN 31051 (2003)

Die während der Nutzungsphase anfallenden Umbau-, Umnutzungs-, Sanierungs-, Modernisierungs- oder Revitalisierungsmaßnahmen, die sich aus technischen Notwendigkeiten oder aus den wandelnden Anforderungen hinsichtlich Ästhetik, Kostenwirtschaftlichkeit oder Wertschöpfung ergeben, werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht betrachtet. Bei den genannten Maßnahmen handelt es sich um solche, die nicht in Zusammenhang mit der Funktionsfähigkeit eines Gebäudes zu erbringen sind, sondern aus gesetzlichen oder nutzerspezifischen Änderungswünschen resultieren. Am Ende der Le-

Lebensdauer eines Gebäudes erfolgt die Beseitigung des Bauwerks durch konventionellen Abbruch bzw. kontrollierten Rückbau und Entsorgung der Baurestmassen.

Die Lebensdauer ist somit sowohl für die Beurteilung der Lebenszyklusphasen als auch für die Berechnung von Lebenszykluskosten von zentraler Bedeutung. Dabei wird zwischen der technischen und der wirtschaftlichen Lebensdauer eines Objekts unterschieden, wobei es unerheblich ist, ob damit ein einzelnes Bauelement, eine Bauteilschicht oder ein ganzer Gebäudekomplex gemeint ist.

Die wirtschaftliche Lebensdauer bezeichnet den Zeitraum, in dem es unter den gegebenen Umständen ökonomisch sinnvoll ist, ein Bauteil bzw. das Gebäude zu nutzen oder zu betreiben. Sie unterliegt legislativen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Einflüssen und ist unabhängig von der technischen Lebensdauer, kann diese jedoch nicht überschreiten. Die wirtschaftliche Lebensdauer ist ein Begriff der wirtschaftlichen Wertermittlung und ist umso größer, je anpassbarer das Gebäude und seine Teile an die geänderten Ansprüche sind. Das Ende der wirtschaftlichen Lebensdauer ist erreicht, wenn die Rentabilität nicht mehr gegeben ist, d. h. die Kosten der Gebäudenutzung die Erträge übersteigen. Nach Herzog (2003) wird die wirtschaftliche Nutzungsdauer von Gebäuden bzw. die wirtschaftliche Lebensdauer von Bauteilen und Materialien im Wesentlichen von den folgenden Faktoren beeinflusst:

- Qualität des Gebäudes (z. B. flexible Grundrissanordnung und -gestaltung bei Nutzungsänderung, Qualität der Ausstattung)
- Art der Nutzung (z. B. Bürogebäude, Krankenhaus)
- baulicher Zustand und technischer Standard (z. B. neue Richtlinien und Verordnungen)
- konstruktive Abhängigkeiten (z. B. baulicher Schutz durch vorstehende Dächer)
- Lage des Grundstücks und Infrastruktur (z. B. City- oder Randlage)
- nutzerspezifische Ansprüche an die Qualität und das optische Erscheinungsbild (z. B. veränderte gestalterische Bedürfnisse)

Die technische Lebensdauer beschreibt die Zeitspanne zwischen Errichtung und Ausfall. Sie definiert die Lebenserwartung, in der ein Gebäude, Bauteil oder Material – unter Einbeziehung der notwendigen und üblichen Instandhaltungsmaßnahmen und unter Berücksichtigung der Abnutzung – seinen Funktionen und seinem bestimmungsgemäßen Gebrauch voll genügen kann. Sie wird von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit umfassend erläutert werden. Mit dem Erreichen der technischen Lebensdauer ist die Funktionsfähigkeit eines Gebäudes bzw. der Gebäudeteile nicht mehr gewährleistet, wohingegen mit dem Ende der wirtschaftlichen Lebensdauer

die Qualität nicht mehr den nutzerspezifischen Ansprüchen oder dem Stand der Technik genügt. Beides resultiert schließlich im Austausch oder Abriss einzelner Bauteile oder der Gesamtkonstruktion.

Die Nutzungsdauer von Bauteilen wird in dieser Arbeit als Zeitraum der geplanten Nutzung bei gleichbleibenden Ansprüchen und Wirtschaftlichkeit definiert. Mit Hilfe von Instandhaltung, Instandsetzung und Modernisierung, die auch veränderten Ansprüchen gerecht werden, kann die Nutzungsdauer entsprechend verlängert werden und somit der technischen Lebensdauer gleichgesetzt werden.

Die Lebensdauer eines öffentlichen Gebäudes wird in der Regel mit 40 bis 80 Jahren angenommen. Diese Annahme resultiert aus der wirtschaftlichen Nutzung und ist Grundlage der Wirtschaftlichkeits- und Finanzierungsüberlegungen. Zudem ist damit der Abschreibungszeitraum formuliert. Da die Nutzungsgewohnheiten heute schnelleren Änderungen unterworfen sind, sollte von einer Referenzzeit von höchstens 50 Jahren ausgegangen werden. Dieser Wert wurde inzwischen auch in die Grundlagen der Tragwerksplanung nach DIN 1055-100 (2001) als Bemessungszeitraum aufgenommen. Eine längere Nutzungsdauer von bis zu 80 Jahren erscheint allenfalls bei Infrastrukturbauwerken angemessen. Das bestätigt u. a. die Wertermittlungsrichtlinie des BMVBS (2006) mit der Angabe der wirtschaftlichen Gesamtnutzungsdauer bei ordnungsgemäßer Instandhaltung und -setzung:

- Verwaltungsgebäude	50 – 80 Jahre
- Schulen	50 – 80 Jahre
- Krankenhäuser	40 – 60 Jahre
- Gefängnisse	50 – 80 Jahre

Der Lebenszyklus eines Gebäudes umfasst die Art und den Umfang der Nutzung in der geplanten oder erwarteten Lebensdauer, somit ist der Begriff im Zusammenhang mit den im Lebenszyklus entstehenden Kosten der Immobilienbewirtschaftung zunehmend wichtiger geworden. Der Begriff Lebenszykluskosten ist verbunden mit einer ganzheitlichen Sicht der im Zeitablauf entstehenden Kosten, die nach ihrer Art in der DIN 18960 (2008) – Nutzungskosten im Hochbau – dargestellt und gegliedert sind. Kosten für Neubau, Umbau und Modernisierung von Bauwerken sowie die damit zusammenhängenden projektbezogenen Kosten sind hingegen in DIN 276-1 (2006) geregelt.

Die Lebenszykluskosten eines Gebäudes werden im Rahmen dieser Arbeit mit den Nutzungskosten gleichgesetzt, da die bis zum Nutzungsbeginn entstehenden Kapital- und Betriebskosten den Baunebenkosten zugerechnet werden (Gesamtsumme der Baukosten). Hinzu kommen noch Rückbaukosten in der Nutzungszeit sowie Abrisskosten, um den Lebenszyklus abzuschließen (siehe Abbildung 3-3).

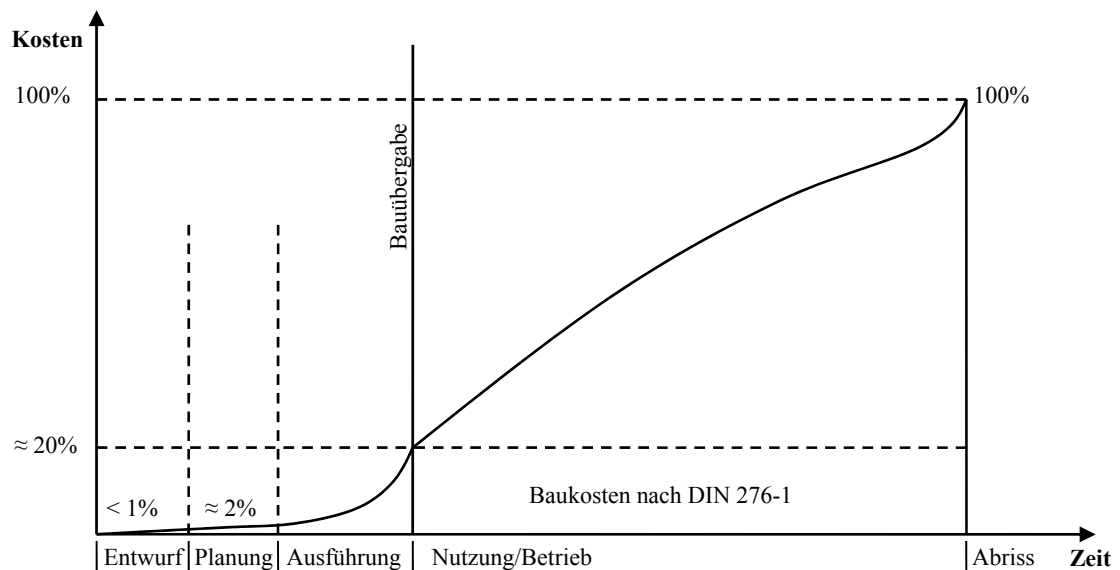


Abbildung 3-3: Lebenszykluskosten von Immobilien nach IFB (2004)

Wichtig ist der Zusammenhang der Qualitätsentscheidung in der Projektentwicklung und Planung mit den später entstehenden Nutzungskosten. So haben z. B. Wärmeschutz und Heizkosten einen direkten Zusammenhang: Je besser der Wärmeschutz ist, desto geringer sind die Heizkosten. Aufeinander abgestimmte, möglichst einheitliche Lebensdauern der Baustoffe vereinfachen die Instandhaltung und Instandsetzung bzw. vermindern die Zerstörung von Bauteilschichten, die noch keiner Instandhaltung bedürfen. Es geht primär darum, das vorhandene Investitionsvolumen so einzusetzen, dass die Baunutzungskosten minimiert werden. Insoweit ist es wichtig, die optimale Gesamtwirtschaftlichkeit in der Werterhaltung und Wertschöpfung zu gewährleisten.

3.2 Aktuelle Bestrebungen im Bereich der Lebensdauerermittlung

Der aktuelle Stand der Forschung im Bereich der Lebensdauerermittlung von Bauelementen muss differenziert betrachtet werden. Zwar wird in nahezu allen Bereichen auf Material- bzw. Bauteilebene in Richtung Vorhersage der Lebensdauer gearbeitet, jedoch wurden nur sehr selten bauteilübergreifende oder systemübergreifende Arbeiten veröffentlicht. Neben den allgemeinen Lebensdauerkatalogen, wie z. B. im Leitfaden Nachhaltiges Bauen des BMVBS (2001) oder der aktuell laufenden Überarbeitung der Nutzungsdauertabellen durch das BBSR, in denen diverse Lebensdauerdaten verschiedener Autoren zusammengefasst wurden, lassen sich im Wesentlichen drei verschiedene Kategorien der Lebensdauerforschung unterscheiden:

- Dauerhaftigkeit von Materialien und Elementen
- Lebensdauervorhersage und ihre Methoden

- Instandhaltungsoptimierung

Das Alterungsverhalten einzelner Bauelemente bzw. die Dauerhaftigkeit von Materialien wird in unzähligen Veröffentlichungen fortlaufend auf den neuesten Stand gebracht und aktualisiert. Auf eine Nennung der vielen Autoren wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da eine Aufzählung den Rahmen dieser Arbeit erheblich überschreiten würde. Rudolphi (2005) und Jernberg, Kucera et al. (2004) beschäftigen sich sehr ausführlich mit den Eigenschaften der einzelnen Baumaterialien und ihrem Alterungsverhalten. Testverfahren für die Lebensdauervorhersage von einzelnen Materialien wurden aktuell von Daniotti (2010) zusammengetragen. Daniotti geht ausführlich auf die verschiedenen Versuchsaufbauten für die Bewitterung von Holz, die Dauerhaftigkeit von Metallen, die Schädigungsmechanismen im Beton und Mauerwerk sowie auf die Alterung von Dächern und Fassaden ein und stellt einen Zusammenhang her zwischen möglichen Versuchsergebnissen und echten Lebensdauerdaten, so dass eine allgemeine Vorgehensweise für den Umgang mit Versuchsdaten abgeleitet werden konnte.

Für die Lebensdauervorhersage haben sich verschiedene Methoden in der Wissenschaft etabliert. Neben der in der DIN ISO 15686 verankerten Faktoren-Methode (siehe auch Abschnitt 4.4) kommen ingenieurmäßige Ansätze und probabilistische Methoden ebenso zur Anwendung wie Mischformen aus allen Bereichen. Jernberg, Lacasse et al. (2004), Hovde (2004) und Moser (2004) geben in ihren Sachstandsberichten einen guten Überblick über den aktuellen Forschungsstand. Weitere Arbeiten seit 2004 sind eher als Anwendungsmöglichkeiten der beschriebenen Methoden zu sehen und führen lediglich zu einem allmählichen Auffüllen des noch immer sehr geringen Datenbestandes bezüglich der Quantifizierung von Einflussfaktoren.

Im Bereich der Instandhaltungsoptimierung sind vor allem die Arbeiten von Bahr (2008), mit einer sehr aufwendigen Realdatenanalyse und Ryll (2008), mit einer Arbeit zu zustandsorientierten Instandhaltungsstrategien zu nennen. Weiterhin zu erwähnen ist der Tagungsband der Aachener Bausachverständigentage (2008), der sich unter anderem umfassend mit der Aufnahme von Lebensdauerdaten in die Technischen Regelwerke auseinandersetzt.

3.3 Grundlagen der Lebensdauerermittlung nach DIN ISO 15686

Die „gewerkeübergreifende“ Normungsarbeit im Bereich der Lebensdauerplanung von Gebäuden und Bauelementen konzentriert sich im nationalen und internationalen Bereich auf die Überarbeitung bzw. Vervollständigung der elfteiligen Normenreihe DIN ISO 15686. Im Folgenden werden die einzelnen Teile der Norm inklusive aktuellem Bearbeitungsstand kurz dargestellt. Eine Spezifizierung der normativen Regelungen auf einzelne Bauteile ist in den jeweiligen Fachnormen der Einzelbauteile geregelt. Dort sind

weiterführende Angaben zur Dauerhaftigkeit, zum Langzeitverhalten und zu den jeweiligen Prüf- und Rechenverfahren aufgeführt, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden kann.

„Service Life Planning“, d. h. die Planung der Lebensdauer wird in der Normenreihe DIN ISO 15686 als Gestaltungsprozess definiert, der sicherzustellen versucht, dass die Lebensdauer eines Gebäudes oder einer baulichen Anlage ihrer geplanten Lebensdauer entspricht oder diese überschreitet. Die fachgerechte Durchführung dieser Lebensdauerplanung wirkt sich durch die direkte Schonung von Ressourcen nicht nur positiv auf die Umwelt, sondern auch auf die Finanzierung von Bauwerken aus. Zu den Hauptanreizen der Lebensdauerplanung für den Eigentümer zählen die Reduzierung von Lebenszykluskosten, die Verringerung von Risiken und die Abschätzung von Umweltwirkungen. Der Inhalt der Normenreihe hat hierbei keinen verpflichtenden, sondern einen empfehlenden Charakter. Die folgende Abbildung 3-4 stellt die Beziehungen zwischen den einzelnen Teilen der DIN ISO 15686 zusammen.

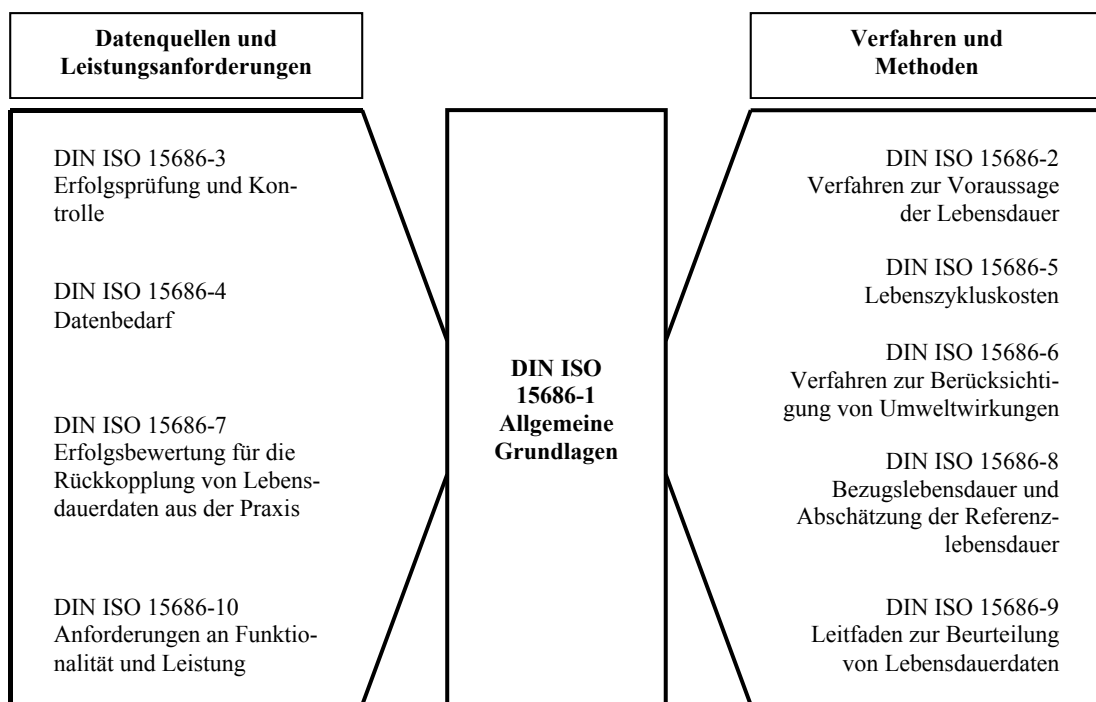


Abbildung 3-4: Themenbereiche der DIN ISO 15686 zur Lebensdauerplanung von Gebäuden

Teil 1 (2000) der Normenreihe beschreibt die Rahmenbedingungen für die Lebensdauerplanung von einzelnen Gebäuden oder baulichen Anlagen über deren Lebenszyklus. Der Planungsprozess umfasst Initiierung, Projektdefinition, Entwurf, Konstruktion, Inbetriebnahme, Betrieb, Instandhaltung, Modernisierung, Austausch, Abbruch und Entsorgung, Recycling oder Wiederverwendung der baulichen Anlage (oder von Teilen) inklusive

aller Komponenten, Systeme und technischen Anlagen. DIN ISO 15686-1 (2000) bietet eine gute und verständliche Einführung in die Thematik der Lebensdauerplanung. Dargestellt werden Einsatzgebiete und Definitionen, die auch für die weiteren Normenteile hilfreich sind. Ebenso relevant sind in diesem Zusammenhang der Leistungsgedanke und die Funktionalität in Verbindung mit einem Performancekonzept. Ein Kernthema der Lebensdauerplanung ist u. a. die Überalterung von Gebäudekomponenten. Diese wird im Normenteil in funktionale, technologische und wirtschaftliche Überalterung unterschieden. Hieraus geht der Hinweis auf unterschiedliche Behandlungsnotwendigkeiten von Lebensdauerdaten hervor. Konkrete Zahlenwerte zu Lebensdauern sind, wie auch in den übrigen Teilen der Normenreihe, nicht angegeben.

Gegenstand des Teils 2 (2001) der Normenreihe sind Verfahren, die die Vorhersage der Lebensdauer erleichtern. Beschrieben werden generelle Rahmenbedingungen, Richtlinien und Anforderungen zur Anleitung und Auswertung entsprechender Studien. Auf Techniken zur Voraussage der Lebensdauer von Gebäudekomponenten wird im Detail nicht eingegangen. Der Normenteil liefert detaillierte technische Hinweise, welchen Anforderungen verschiedene Typen von Praxistests zur Bestimmung der Lebensdauer genügen sollten, jedoch keine konkreten Angaben zur Durchführung der Tests. In diesem Zusammenhang wird auf die Problematik der Übertragbarkeit von Kurzzeittests auf längere Betrachtungszeiträume und der Übertragbarkeit spezieller Testbedingungen auf den reellen Einsatz im Gebäude hingewiesen.

Teil 3 (2002) der Normenreihe beschäftigt sich mit der effektiven Anwendung der Lebensdauerplanung. Er beschreibt den Ansatz und die Verfahren, die von der Konzeptphase über die Entwurfs- und Planungsphase, die Phase der Konstruktion und das Instandhaltungsmanagement bis hin zur Entsorgung von Gebäuden und baulichen Anlagen eingesetzt werden können, um den Einsatz der Methode sicherzustellen. Es sollen Kontrollen der geplanten Lebensdauern durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die Leistung eines Bauwerks, einer baulichen Anlage oder einer Komponente über einen bestimmten Zeitraum adäquat in der Lebenszyklusplanung berücksichtigt wurde. Zur Gewährleistung der Objektivität werden die Vorgänge der Kontrollen genau festgelegt. Der Einsatz unabhängiger Prüfer ist hierbei obligatorisch. Die Art und Anzahl der Prüfungen sollte in Abhängigkeit der Projektgröße, Komplexität und des Risikos der Lebensdauerplanung gewählt werden. Der Spielraum der hier entstehenden Entscheidungsmöglichkeiten ist von großer Breite und wird als kritisch für die Lebensdauerplanung angesehen.

DIN ISO 15686-4 (2003) enthält eine detaillierte Beschreibung der zur Anpassung der Lebensdauer an konkrete Bedingungen vorgeschlagenen Methoden. Zum einen ist hier die Faktoren-Methode zu nennen, zum anderen eine algorithmische Vorgehensweise, die anhand von Gebäudekategorie und Randbedingungen die Untersuchung und Einschätzung ganzer Produktgruppen ermöglicht. Es wird für beide Methoden darauf hingewie-

sen, dass ihre Anwendung nicht verpflichtend ist und sie aufgrund der bisher nicht konsistenten Datenlage stark fehlerbehaftet sind. Sie sollten daher nur vorläufig angewendet werden, bis eine Methode von höherer Objektivität vorliegt. Sobald eine verlässliche Datengrundlage für die Lebensdauerplanung verfügbar ist, sowie die Einflussfaktoren zur Anpassung der einzelnen Faktorwerte genau erforscht sind, soll die Faktoren-Methode eine praxismgerechte Grundlage für die Einschätzung der Lebensdauern für frühe Planungsphasen darstellen. Des Weiteren enthält der Normenteil nur wenige direkt verwertbare Aussagen. Kernaussage ist, dass Instandsetzungsstrategien einen Einfluss auf Austauschzyklen haben und damit auch auf die Nachhaltigkeit im Gebäudebereich.

In Teil 5 (2007) der Normenreihe werden die Verfahren zur Steigerung der Effizienz der Lebenszykluskostenanalyse von Gebäuden, baulichen Anlagen und ihren Elementen beschrieben. Die Abschätzung soll Kostenflüsse (auch Einkommen und externe Kosten, falls Bestandteil der Betrachtung) von der Akquise eines Projektes, über seinen Betrieb bis hin zu seiner Entsorgung berücksichtigen und stellt damit eine Prognose zukünftiger Kosten auf Bestands-, Projekt- oder Bauelementebene dar. Als Betrachtungszeitraum kann neben dem kompletten Lebenszyklus auch ein Teilabschnitt der Lebensdauer eingesetzt werden. In der Analyse sollte daher auf den gewählten Zeitabschnitt hingewiesen werden.

Die Beurteilung potentieller Umweltwirkungen in der Entwurfsphase wird in Teil 6 (2004) der Normenreihe beschrieben. Hier wird die Schnittstelle zwischen der ökologischen Lebenszyklusanalyse und der Lebensdauerplanung aufgezeigt, die sich mit der Integration von Umweltwirkungen in die Lebensdauerplanung beschäftigt. Betont wird, dass nicht nur die ökologischen Faktoren ein Produkt zum Einsatz im Bauwerk qualifizieren, sondern zudem eine Übereinstimmung mit den festgelegten Leistungsanforderungen in verschiedener Hinsicht gegeben sein muss. Es wird explizit ausgesagt, dass für die Entscheidungsfindung im Planungsprozess die Methoden der LCC bzw. WLC, LCA und der Lebensdauerplanung SLP effizient zusammenwirken sollen.

Teil 7 (2005) der Normenreihe liefert die Grundlage für die Leistungsbewertung der Rückmeldung von Lebensdauerdaten existierender Gebäude und baulicher Anlagen aus der Praxis. Ebenfalls Bestandteil ist eine Definition der notwendigen Begriffe und eine Anleitung, wie die technische Leistung beschrieben und dokumentiert werden kann, um die notwendige Konsistenz zu gewährleisten. Die Rückmeldung von Lebensdauerdaten aus der Praxis ist ein wichtiges Element für die Datenvalidierung. Eine konkret abgegrenzte Methodik ist hilfreich für die Gestaltung von Szenarien, die Kategorisierung von Einfluss- bzw. Schädigungsfaktoren und die Etablierung von Erfahrungswerten für die Komponentenleistung über einen bestimmten Zeitraum. Die im Normenteil vorgestellte Methodik bietet in dieser Hinsicht zum gegenwärtigen Zeitpunkt viele Interpretations-

möglichkeiten, dennoch kann sie als Grundlage für Weiterentwicklungen angesehen werden.

DIN ISO 15686-8 (2008) stellt eine Leitlinie für die Bereitstellung, Auswahl und Formierung von Lebensdauerdaten dar. Es werden Anhaltspunkte für die Berechnung der Faktoren aufgezeigt und die Anwendung der Daten für die Berechnung der geschätzten Lebensdauer unter Verwendung der Faktoren-Methode beschrieben. Aufgrund der nur lückenhaft vorliegenden Erfahrung kann auch hier auf die Erwähnung entstehender Unsicherheiten nicht verzichtet werden. Der Hinweis, die Faktoren-Methode auf verschiedenen Ebenen der Lebensdauerplanung einzusetzen, wird als praktikabel erachtet. Die inhaltlichen Anforderungen an Datensätze sind logisch aufgebaut und fassen die Angaben der übrigen Normenteile übersichtlich zusammen. Eine Definition von Anforderungen an Systemgrenzen bzw. Datentiefe ist nicht vorhanden.

Der 9. Teil der Normenreihe stellt eine Grundlage und Anleitung für die Herleitung und Präsentation von Lebensdauerdaten dar. Freiwillige Lebensdauerdeklarationen können von Herstellern oder Produzenten in Abhängigkeit von der Marktnachfrage erstellt werden und im Bereich der Lebensdauerplanung nach DIN ISO 15686-1 und DIN ISO 15686-8 eingesetzt werden. Der in DIN ISO 15686-9 (2008) enthaltene Leitfaden fasst die Anforderungen an die Beurteilung von Lebensdauerdaten, die auch schon in anderen Teilen der Normenreihe ausschnittsweise erwähnt wurden, zusammen. Bestandteil sind zudem Anforderungen an Angaben zur Produktleistung, denen von Herstellerseite entsprochen werden sollte.

Kernthematik des Teils 10 (2007) der Normenreihe ist die Festlegung von Stufen für Funktionalität und Gebrauchstauglichkeit für Themenbereiche, die relevant für Nutzer und andere Interessensgruppen sind. In einer Soll-Ist-Analyse werden jeweils, unter Berücksichtigung der durch Nutzer oder Interessensgruppen vorgegebenen Anforderungen, Mankos oder Überschüsse identifiziert. Die daraus ermittelte Information wird in Verbindung mit der in anderen Teilen der Normenreihe ermittelten Information genutzt, um eine facilitäre Anlage oder einen facilitären Anlagenbestand über den Lebenszyklus zu begleiten. Es ist zweckmäßig, Änderungsstufen der Funktionalitätsanforderungen über den Lebenszyklus aufzustellen, um die möglicherweise anfallenden Leistungen und Kosten zu untersuchen und gegebenenfalls anzupassen. Eine Nichtberücksichtigung wahrscheinlicher Änderungen der Funktionalitätsanforderungen kann einen Wertverlust der facilitären Anlage begünstigen und sollte genau begründet und dokumentiert werden.

Ein noch ausstehender 11. Teil der Norm soll Begriffe enthalten, die zur Anwendung in der Lebensdauerplanung von Bauwerken und baulichen Anlagen geeignet sind und in den Dokumenten des ISO/TC59/SC14 „Design Life“ eingesetzt werden.

Aktuelle Überarbeitungen konzentrieren sich derzeit auf die Teile 1 „General principles“, 2 „Service life prediction procedures“ und 4 „Data requirements“ der DIN ISO 15686. An weiteren Überarbeitungen, z. B. am noch nicht abgeschlossenen Teil 10 der Norm, wird nach derzeitigem Stand nicht gearbeitet.

3.4 Abnutzung, Wertverlust und Alterungsverhalten

Jedes fachgerecht eingebaute Bauteil weist nach dem Einbau, abhängig z. B. von der Herstellung oder der Instandhaltung, eine bestimmte Gebrauchs- oder Funktionsfähigkeit auf. Dieser so genannte Abnutzungsvorrat reduziert sich im Verlauf der Nutzungsphase, kann jedoch durch Instandhaltungsmaßnahmen wiederhergestellt werden. Das in Abbildung 3-5 dargestellte Modell stellt den theoretischen Abnutzungsverlauf vereinfacht durch eine Kurve dar. Es wird davon ausgegangen, dass ein Bauteil nicht linear altert, sondern dass die Abnutzung im Laufe des Bauteilalters zunimmt. Der Abnutzungsvorrat beträgt bei Inbetriebnahme des Bauteils 100%. Dieser Vorrat wird im Laufe der Zeit durch die Nutzung sowie durch innere und äußere Einflüsse abgebaut, kann aber durch Wartungsmaßnahmen in begrenztem Umfang wiederhergestellt werden. Bei Überschreitung der Schadensgrenze ist der Abnutzungsvorrat so gering (t_{A1}), dass ein Schaden am Bauteil eintritt. Zum endgültigen Ausfall kommt es bei einem Abnutzungsvorrat von 0%, wobei spätestens zu diesem Zeitpunkt der Abnutzungsvorrat durch Maßnahmen der Instandhaltung wiederhergestellt werden muss. Auf Grund von technischen Verbesserungen ist es möglich, den Abnutzungsvorrat über die Grenze von 100% des Ursprungsbauteils zu erweitern.

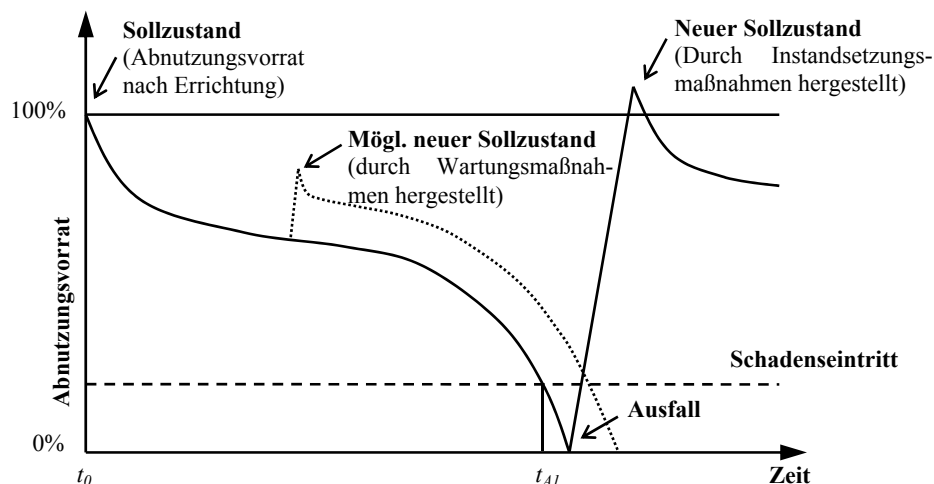


Abbildung 3-5: Theoretischer Verlauf der Abnutzung eines Bauteils

Das Alterungsverhalten von Bauteilen wird in der Literatur durch verschiedene Modelle beschrieben. Je nach bauteilbedingter Alterung und Abnutzung können drei Arten der Alterung unterschieden werden:

- Typ I: Bauteile, deren Abnutzung für eine lange Zeit sehr gering ist, dann aber schlagartig zunimmt.
- Typ II: Bauteile, deren Alterung stetig zunimmt.
- Typ III: Bauteile, die am Anfang und am Ende ihrer Nutzungsphase schnell altern, während in der Mitte ihres Lebensabschnitts die Abnutzung gering ist.

In der folgenden Abbildung 3-6 werden die drei Alterungstypen dargestellt. Bei der Betrachtung des Alterungsverhaltens von Bauteilen interessiert jedoch häufig nicht nur das Alterungsverhalten des Bauteils über seine Gesamtlebenszeit, sondern besonders auch sein aktueller Zustand. Hinsichtlich des Abnutzungsfortschritts werden deshalb nach Krug (1985) vier Abnutzungsstufen a bis d unterschieden:

- Zustand a: Der Zustand des Bauteils liegt bei max. 85%, gemessen am Zustand der Errichtung, d. h. es treten keine oder nur unbedeutende Schäden auf.
- Zustand b: Der Zustand liegt zwischen 60% und 85%, gemessen am Zustand der Errichtung, d. h. es treten nur geringe Schäden auf.
- Zustand c: Der Zustand liegt zwischen 20% und 60%, gemessen am Zustand der Errichtung, d. h. die Gebrauchs- oder Funktionstüchtigkeit ist erheblich gemindert und es können schwere Schäden auftreten.
- Zustand d: Der Zustand des Bauteils liegt unter 20%, d. h. das Bauteil hat seine Lebensdauergrenze erreicht und muss sofort oder baldmöglichst ausgetauscht bzw. instandgesetzt werden.

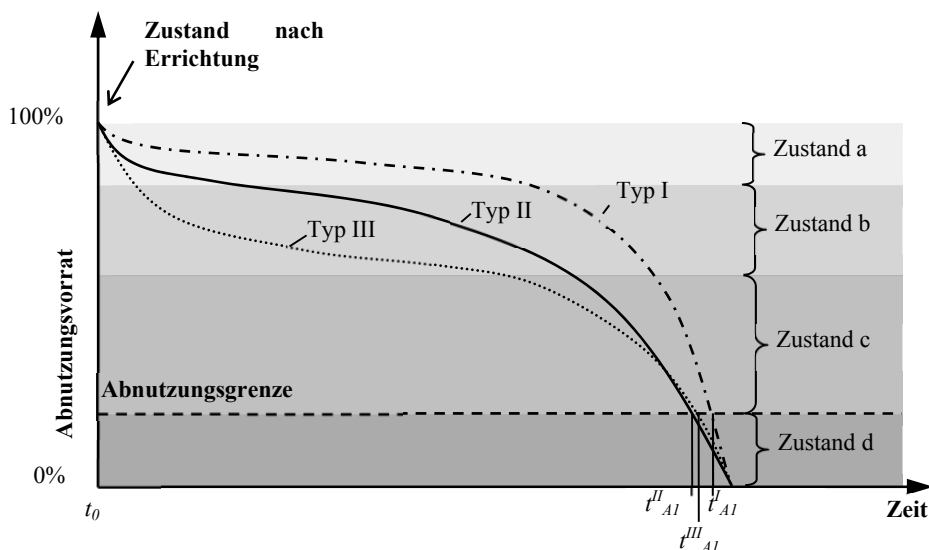


Abbildung 3-6: Prinzipien des materiellen Alterungsverhalten

In der Literatur ist eine Reihe von Forschungsarbeiten zur Alterung von Bauteilen zu finden. Schröder (1992) beispielsweise, ermittelt anhand von 13 Bauteilen spezifische Altersentwertungskurven, bei denen zwischen monetärem Wert (Marktwert), physischem Wert (Abnutzung) und funktionalem Wert (Gebrauchstauglichkeit) unterschieden werden muss. Zur Ermittlung des Wertverlusts wird ein mathematisch definiertes Verhältnis zwischen dem Wert W und dem Alter t eines Bauteils aufgestellt, so dass die Bauteilentwertung mit folgender Formel mathematisch berechnet werden kann.

$$W = 1 - t^a \quad (3.1)$$

Der Ansatz von Schröder (1992) ermöglicht für die unterschiedlichen Bauteile und deren Eigenschaften eine Variation des Alterungsverlaufs. Hierfür ist in der Formel ein bauteilspezifischer Exponent a enthalten, der entsprechend der jeweiligen Robustheit angepasst werden kann. In der Regel wird die Lebensdauer eines Bauteils in zwei Phasen mit verschiedenen Alterungskurven aufgeteilt, wobei der Übergangspunkt abgeschätzt werden muss.

Die Alterungsgeschwindigkeit von Bauteilen ist unterschiedlich. Die meisten Bauteile verlieren in der ersten Hälfte ihrer Nutzungszeit relativ langsam an Wert und altern in späteren Jahren schneller. In nachfolgender Abbildung 3-7 sind unterschiedliche Altersentwertungen beispielhaft dargestellt:

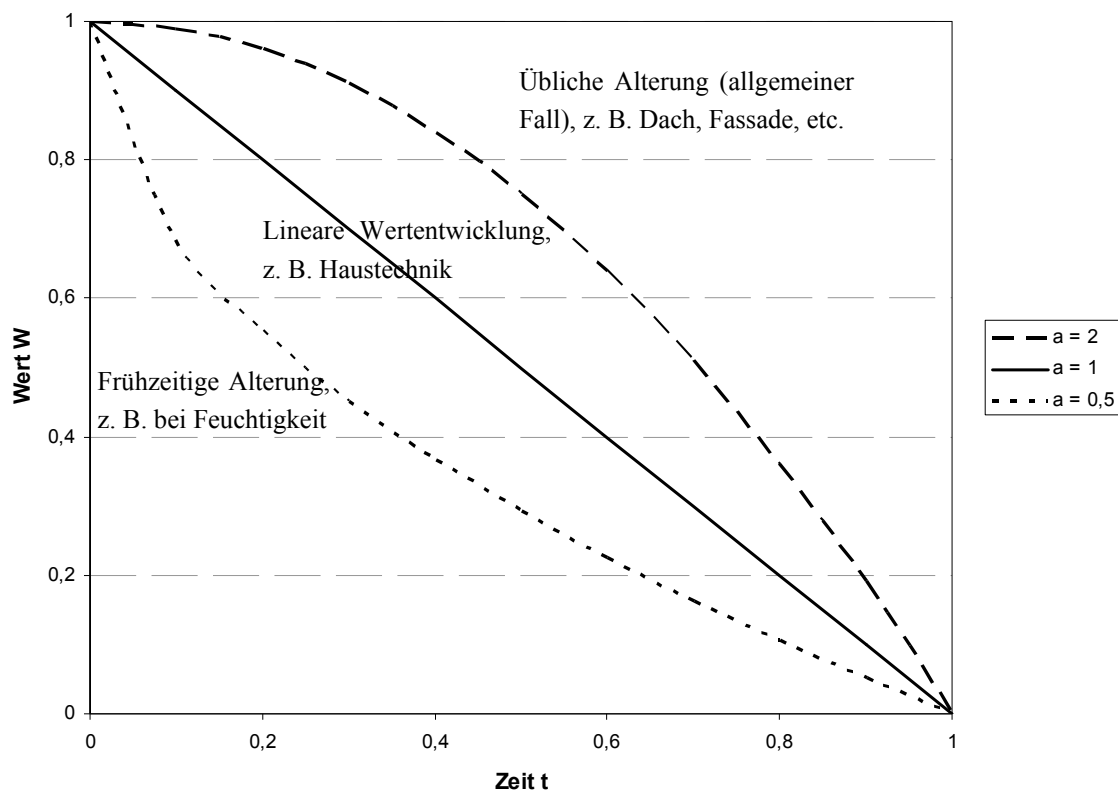


Abbildung 3-7: Beispielhafte Altersentwertungskurven nach Schröder (1992)

Im Impulsprogramm Bau (IP Bau (1994)) vom Schweizer Bundesamt für Konjunkturfragen werden für die Untersuchung des Alterungsverhaltens von Bauteilen seit den 30er Jahren über 120 Objekte untersucht und deren Alterungsverhalten dokumentiert. Der Zustand der Bauteile wird auf Sicht und unter Zuhilfenahme einer einfachen Überprüfung der Funktionstauglichkeit bewertet. Als Ergebnis dieser Untersuchung werden jeweils drei Kurven pro Bauteil entwickelt. Die Alterungskurve L_{min} , die die Alterungskurve für das Bauteil unter den schlechtesten Voraussetzungen zeigt, die Alterungskurve L_0 , die die Alterung unter durchschnittlichen Bedingungen abbildet und die Alterungskurve L_{max} , die für die Lebensdauer unter optimalen Bedingungen steht. Am Beispiel „Steildach“ zeigt die Abbildung 3-8 ein beispielhaftes Wert – Alterungsdiagramm aus IP Bau (1994). Durch die Bestimmung von Zustand und aktuellem Bauteilalter kann anhand dieser Diagramme u. a. die Restlebensdauer von Bauteilen im Bestand ermittelt werden.

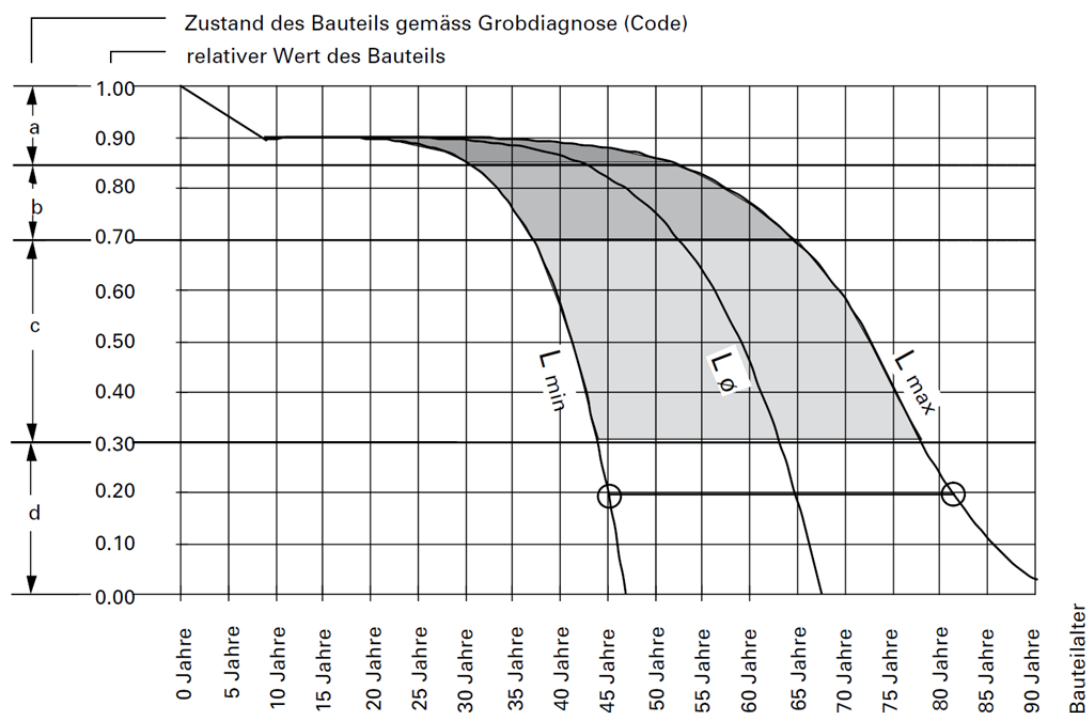


Abbildung 3-8: Alterungsverhalten und Restlebensdauer am Beispiel Steildach (IP Bau (1994))

Auch wenn die Lebensdauer einzelner Bauteile mit diesen Kurven grob vereinfacht dargestellt und ermittelt werden kann, gilt dies nur für die materielle Abnutzung. Grundsätzlich wird bei Bauteilen zwischen materieller und immaterieller Abnutzung unterschieden. Die materielle Abnutzung beschreibt den Abbau des Abnutzungsvorrats durch Verschleiß, Reibung oder sonstige direkte Einflüsse. Bei der immateriellen Alterung wird die Alterungsgrenze nicht durch Materialversagen, sondern durch veränderte Ansprüche und Anforderung der Nutzer erreicht. Dabei kann es durch technischen Fortschritt, durch wirtschaftliche oder ästhetische Gründe zu einem Austausch des Bauteils kommen. Die immaterielle Alterung hat oft zur Folge, dass Bauteile, die ihren Abnutzungsvorrat noch

nicht erreicht haben, ersetzt werden, da sich Ansprüche oder Nutzungsart des Gebäudes geändert haben.

3.5 Unterhaltungs- und Instandhaltungsstrategien

Für die Unterhaltung von Gebäuden muss zwischen Instandhaltungsstrategien auf Gebäudeebene und Strategien auf Bauteilebene unterschieden werden. DIN EN 13306 (2001) definiert die Instandhaltungsstrategie als eine „Vorgehensweise des Managements zur Erreichung der Instandhaltungsziele“. Sie beschreiben Vorgehensweisen, die Art und Umfang der Instandhaltungsmaßnahmen festlegen und sind damit Grundlage für eine wirtschaftliche Planung und Durchführung.

Klingenberger (2007) schlägt vor, die Instandhaltungsstrategien anhand der charakterisierenden Maßnahmen zu unterscheiden. Dieser Vorschlag wird im Rahmen dieser Arbeit für die Instandhaltungsstrategien auf Bauteilebene weiterverfolgt.

Die Strategien auf Gebäudeebene werden hier nur kurz genannt und nicht weiter ausgeführt:

- Wertsteigerung
- Werterhaltung
- „Low-Level“-Strategie (Minimalsicherheit zur Weiternutzung)
- „Null-Unterhalt“ mit nachfolgendem Abbruch und Ersatzneubau (Verlottsungsstrategie)

Als Basis für die weitere Arbeit wird die Werterhaltung als Referenzstrategie festgelegt, bei der die Gebrauchstauglichkeit auf dem Niveau des ursprünglichen Komforts erhalten werden soll, um die geplante Nutzung dauerhaft zu gewährleisten.

Auf Bauteilebene sind zunächst die präventiven und die korrektiven Instandhaltungsstrategien zu unterscheiden (siehe Abbildung 3-9). Gemäß DIN EN 13306 (2001) sind präventive Instandhaltungsstrategien dadurch gekennzeichnet, dass Instandhaltungsmaßnahmen bereits vor dem Ausfall des Instandhaltungsobjekts durchgeführt werden, um eine eingeschränkte Funktionserfüllung zu vermeiden und die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls zu verringern. Bei korrektiven Instandhaltungsstrategien werden demgegenüber erst nach dem Unterschreiten der Abnutzungsgrenze des Bauteils Instandhaltungsmaßnahmen initiiert und durchgeführt.



Abbildung 3-9: Einteilung der Instandhaltungsstrategien nach Klingenberg (2007)

Im Rahmen der Strategie der vorausbestimmten Instandhaltung werden Instandhaltungsmaßnahmen zu festgelegten Zeitpunkten ohne Berücksichtigung des Zustands respektive des vorhandenen Abnutzungsvorrats des Instandhaltungsobjekts durchgeführt. Bei der Anwendung der Strategie der voraussagenden Instandhaltung werden erst infolge einer Ermittlung des Zustands respektive des vorhandenen Abnutzungsvorrats des Instandhaltungsobjekts für einen definierten Zeitraum die zukünftig durchzuführenden Instandhaltungsmaßnahmen und ihre Zeitpunkte festgelegt. Wohingegen die Strategie der zustandsbestimmten Instandhaltung ein kontinuierliches Überwachen des Abnutzungsvorrats bedingt. Bei Erreichen eines vorab definierten Zustandes respektive einer festgelegten Menge an Abnutzungsvorrat des Instandhaltungsobjekts werden Instandhaltungsmaßnahmen eingeleitet. Bei diesen präventiven Instandhaltungsstrategien liegt der Fokus auf der Vermeidung von Ausfällen.

Die Gruppe der korrektiven Instandhaltungsstrategien setzt sich aus der Strategie der ausfallbedingten Instandhaltung und der Strategie der aufgeschobenen Instandhaltung zusammen (siehe Abbildung 3-9). Während die Strategie der ausfallbedingten Instandhaltung dem Unterschreiten der Abnutzungsgrenze mit Instandhaltungsmaßnahmen direkt nach dem Ausfall des Instandhaltungsobjekts begegnet, werden im Sinne der Strategie der aufgeschobenen Instandhaltung Maßnahmen trotz eingeschränkter oder nicht vorhandener Funktionserfüllung zurückgestellt.

Eine Entscheidung über die jeweils geeignete Instandhaltungsstrategie muss im Einzelfall getroffen werden. Klingenberg (2007) liefert eine Entscheidungshilfe, die als Werkzeug für eine systematische Instandhaltungsplanung anzuwenden ist. Der Einfluss der Instandhaltung auf die Lebensdauer von Bauteilen und den Wert einer Immobilie ist in folgender Abbildung angelehnt an Christen & Meyer-Meierling (1999) grafisch dargestellt. Mit zunehmendem Bauteilalter wächst der Einfluss der Instandhaltung. Grenzbereiche der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit sind nur bei tragenden Bauteilen eindeutig zu

unterscheiden. Für nichttragende Bauteile und Ausbauelemente sind derartige Übergänge fließend bzw. durch Qualitätsstandards zu bestimmen. Die dargestellte Bewohnbarkeitschwelle definiert häufig den Zeitpunkt des Austauschs aus wirtschaftlichen Gründen, auch wenn die technische Lebensdauer des Bauteils noch nicht erreicht ist.

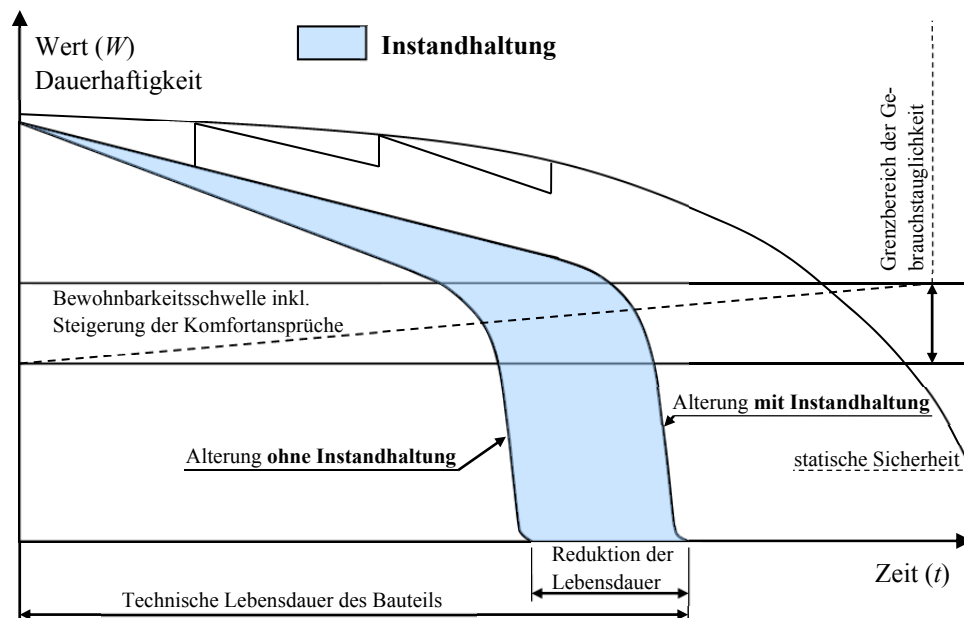


Abbildung 3-10: Einfluss der Instandhaltung auf die Lebensdauer

3.6 Zusammenfassung

Das vorliegende Kapitel 3 gibt einen ersten Einblick in die Lebensdaueranalyse und den damit verbundenen Grundlagen zur Alterung von Bauteilen und deren Instandhaltung. Nach einem groben Abriss der Lebenszyklusanalyse mit Abgrenzung der verschiedenen Begriffe und Anwendungsmöglichkeiten in Abschnitt 3.1, wurden in Abschnitt 3.2 die umfangreichen Forschungstätigkeiten zum Thema Lebensdauern strukturiert und anhand einiger Veröffentlichungen dokumentiert. Die Untergliederung der Forschung in Dauerhaftigkeitsuntersuchungen, Methoden der Lebensdauervorhersage und Arbeiten zur Instandhaltungsoptimierung wird dabei als sinnvolle Abgrenzung angesehen. Abschnitt 3.3 beschäftigt sich ausführlich mit der Normenreihe DIN ISO 15686, die die bislang einzige gewerkeübergreifende Richtlinie zur Lebensdauervorhersage von Bauteilen darstellt. Es werden die einzelnen Teile der Norm erläutert und etwaige Unzulänglichkeiten aufgedeckt. Der Inhalt der Norm hat derzeit noch keinen verpflichtenden, sondern nur empfehlenden Charakter. In Abschnitt 3.4 werden mögliche Alterungskurven und Abnutzungsstufen erläutert mit denen die Lebensdauer von Bauteilen grob ermittelt und dargestellt werden kann. Es werden verschiedene Modelle erläutert, die nicht nur das Alterungsverhalten und den Wertverlust berücksichtigen, sondern auch den aktuellen Zustand eines Bauteils bewerten können. Das Impulsprogramm Bau des Schweizer Bundesamts für

Konjunkturfragen beispielsweise, dokumentiert das Alterungsverhalten von Bauteilen anhand von über 120 konkreten Objekten, die zum Teil seit 1930 unter Beobachtung stehen. Als Ergebnis dieser Untersuchungen wurden Alterungskurven je Bauteil entwickelt, die das Alterungsverhalten unter unterschiedlichen Randbedingungen abbilden können. Die in Abschnitt 3.5 beschriebene Instandhaltungsstrategie legt zum einen die Qualität der Instandhaltung und zum anderen den Zustand eines Bauteils zum Ersatzzeitpunkt fest. Die Strategie entscheidet somit über das Ende der Lebensdauer des Bauteils. Eine Strategie, die auf eine qualitativ hochwertige Instandhaltung setzt, wirkt sich positiv auf die Lebensdauer eines Bauteils aus. Durch sorgfältig durchgeführte Inspektionsmaßnahmen können Abnutzungserscheinungen oder Schäden frühzeitig entdeckt und behoben werden, bevor schwerwiegende Schäden entstehen.

4 KRITISCHE ANALYSE AUSGEWÄHLTER VERFAHREN ZUR LEBENSDAUERERMITTLUNG

4.1 Einführung

Die Verfahren zur Vorhersage von Lebensdauern lassen sich grundsätzlich aufteilen in stochastische Methoden und anwendungsorientierte Näherungslösungen.

Die stochastischen Methoden sind meist sehr materialspezifisch und hoch spezialisiert. Das Ziel dieser Methoden ist die möglichst exakte Beschreibung des Alterungsprozesses mithilfe probabilistischer Ansätze, wie z. B. Karbonatisierung und Chloridpenetration bei Stahlbetonbauteilen von Gehlen (2000). Mit einem enormen Anspruch an Detaillierung und Präzision werden verschiedene Beanspruchungen und die damit verbundenen Schadensbilder analysiert. Aufgrund des beträchtlichen Zeit- und Kostenaufwands sind derartige Methoden bislang eher als Insellösungen in sehr spezifischen Bereichen anzusehen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

Die anwendungsorientierten Näherungsmethoden haben zum Ziel die Lebensdauern mithilfe von Annahmen möglichst plausibel abzuschätzen. Aufgrund der fehlenden bzw. marginalen Berücksichtigung relevanter Einflussgrößen sind diese Methoden bislang nur als grobe Näherung zu betrachten. Für einen generellen Ansatz zur Lebensdauerermittlung scheint die DIN ISO 15686-Normenreihe als einzige für die Entwicklung eines generellen Alterungsmodells geeignet, da diese allgemeine Rahmenbedingungen zur Lebensdauerbestimmung vorgibt und so harmonisierte Lebensdauerdaten von Bauprodukten in transparenter und nachvollziehbarer Form ermittelt werden können. In den nachfolgenden Kapiteln sind die wichtigsten anwendungsorientierten Näherungsmethoden inklusive der Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 erläutert.

4.2 Kennwertemethode

Die Kennwertemethode im Bereich der Lebensdauerermittlung basiert auf veröffentlichten Benchmarks zur Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen. Wie bereits in Abschnitt 1.1 kurz angedeutet stehen in der Literatur zahlreiche Quellen mit Lebensdauerdaten zur Verfügung, deren Angaben zumeist auf Erfahrungswerten aus der Praxis oder vereinzelten Herstellerangaben beruhen. Tabelle 4-1 stellt beispielhaft aktuelle Publikationen mit Lebensdauerangaben in einer Übersicht zusammen. Bei den veröffentlichten Lebensdauertabellen handelt es sich fast ausschließlich um Lebensdauerwerte ohne weitere Angaben zu den Randbedingungen, unter denen die Daten gewonnen wurden oder aus welchen Quellen sie stammen. Aufgrund dieser fehlenden Angaben sind noch immer keine Vergleichs- und Beurteilungskriterien vorhanden, da kein einheitlicher Standard existiert, in welcher Form mögliche Lebensdauerdaten zu ermitteln sind.

4 Kritische Analyse ausgewählter Verfahren zur Lebensdauerermittlung

Tabelle 4-1: Aktuelle Lebensdauerdaten in der Literatur

Jahr	Verfasser	Titel
1991	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin	Wertermittlungsrichtlinien, Anlage 5
1994	IP Bau, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern	Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten
1995	Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung, NRW	Geplante Instandhaltung
1995	Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich	Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten
1998	Hirschberger	Senkung der Baufolgekosten durch systematische und zustandsabhängige Erhaltung von Gebäuden und langzeitkostenoptimale Baustoffwahl
1998	Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V., Berlin	Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten
2001	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin	Leitfaden Nachhaltiges Bauen
2001	Hellerforth	Facility Management – Immobilien optimal verwalten
2003	Schweizer Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport	Technische Weisung Beurteilung von Energiesystemen und Energiesparmassnahmen
2004	Institut für Bauforschung e.V., Hannover	Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau
2004	Schmitz, Krings, Dahlhaus, Meisel	Instandsetzung / Sanierung / Modernisierung / Umnutzung
2006	Sachverständigen-Landesverband Steiermark und Kärnten, Österreich	Nutzungsdauerkatalog 2006
2006	Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V., Berlin	Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten
2007	Institute for Building Operations Research, Nürtingen-Geislingen	Technische Lebensdauern
2008	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin	Zwischenauswertung mittlere Lebensdauern
2008	Arbeitsgruppe Bund Technischer Experten e.V., Essen	Lebensdauer von Bauteilen
2008	Schweizerischer Mieterinnen- und Mieterverband, Zürich	Lebensdauer von Bauteilen
2009	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin	Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten
2009	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Berlin	Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen der Kostengruppen 300, 400 und 500 nach DIN 276-1

Bei einem Vergleich der Lebensdauerangaben eines Bauteils zeigen sich aufgrund der verschiedenen Quellen und den unterschiedlichen Randbedingungen zum Teil erhebliche Streuungen der vorhandenen Lebensdauern. Die Abweichungen der Werte verschiedener Quellen wurden beispielhaft bereits in Abbildung 1-1 für das Bauteil Kunststofffenster dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen gebäudespezifischen Eigenschaften und der verschiedenen Einflussfaktoren, die auf ein Gebäude wirken, entspricht die Lebensdauer

eines Bauteils nur selten den Kennwerten aus der Literatur. Die Kennwerte können somit nur als erste Annäherung dienen und sollten in Zukunft durch die Einbeziehung von individuellen Randbedingungen und objektspezifischen Eigenschaften des Gebäudes nachgebessert werden.

4.3 Referenzfaktorenmethode von Tomm, Rentmeister und Finke

Das Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung (LBB) veröffentlichte 1995 in Zusammenarbeit mit der ARGEBAU-Fachkommission „Standardisierung und Rationalisierung“ das „Verfahren zur systematischen Erfassung und Steuerung von Instandhaltungsmaßnahmen an Gebäuden“ (Tomm, Rentmeister, Finke (1995)). Die Grundlage dieses Verfahrens bildet ein Bauelementekatalog, in dem die instandhaltungsrelevanten Bauteile gemäß DIN 276 gegliedert werden. Der Katalog beinhaltet etwa 100 verschiedene Bauteilgruppen und deren Standarddaten als Orientierungshilfe. Die darin angeführten Angaben zur mittleren Lebenserwartung gehen von normalen, durchschnittlichen Verhältnissen bezüglich Nutzung, Qualität, Umwelt und Instandhaltungsintensität aus. Sie basieren auf Erfahrungswerten von Herstellern und Fachleuten sowie eigenen Erfahrungen der Autoren.

In diesem Verfahren werden in einem ersten Schritt die für die Instandhaltung charakteristischen Merkmale des Gebäudes bis hin zum einzelnen Bauelement qualitativ erfasst und aufgelistet. Basierend auf dieser Dokumentation werden die im Katalog angegebenen mittleren Lebensdauern der instandhaltungsrelevanten Bauteile über Abzugsfaktoren (z. B. Elementalter oder Abnutzungsgrad) den spezifischen Verhältnissen angepasst. Dabei werden die aktuelle oder geplante Nutzung, die Ausführungs- und Bauteilqualität, die vorhandenen Umwelteinflüsse und die jeweilige Instandhaltungsintensität als Einflussgrößen berücksichtigt. Anhand dieser Faktoren soll die mittlere Lebensdauerangabe nach oben oder unten korrigiert werden, wobei weder eine Rechenvorschrift, noch eine Vorgabe zur Größe oder Gewichtung der Faktoren vorgegeben wird. Lediglich Beispiele zur Einordnung der Einflussfaktoren in positiver und negativer Richtung werden beschrieben. Die Verlängerung oder die Verkürzung der Lebensdauer erfolgt somit rein subjektiv anhand der individuellen Erfahrung des Anwenders. Vereinfachend wird von einer linearen Bauteilalterung ausgegangen.

4.4 Faktorenmethode nach DIN ISO 15686

Wie bereits in Abschnitt 3.3 beschrieben, gibt die DIN ISO 15686-Normenreihe generelle Rahmenbedingungen für die Lebensdauerabschätzung von Bauprodukten bzw. Bauteilen vor. Ziel der Normenreihe ist die Bereitstellung harmonisierter Lebensdauerdaten von Bauprodukten bzw. Bauteilen, um zuverlässige und vergleichbare Grundlagen für Lebenszyklusanalysen zu schaffen. Der Schwerpunkt wird dabei auf die Vergleichbarkeit

unterschiedlicher Lebensdauerdaten (Erfahrungswerte, Laborkennwerte etc.) bei ähnlichen Randbedingungen (Klima, Nutzungsart etc.) gelegt.

Ähnlich wie das Verfahren von Tomm, Rentmeister und Finke (1995) versucht die in der DIN ISO 15686-4 (2003) definierte Faktorenmethode die tatsächlichen Umweltbedingungen einzelner Bauteile bei der Bestimmung der spezifischen Lebensdauer zu berücksichtigen. Sie soll nur dann zur Anwendung kommen, wenn keine Lebensdauerdaten für ähnliche Einbaubedingungen vorliegen und eine Adaption für den speziellen Einsatzbereich erforderlich wird. In der Faktorenmethode wird die Lebensdauervoraussage für ein konkretes Bauwerk, eine bauliche Anlage oder eine Komponente mithilfe von Faktoren bestimmt, die verschiedenen Kategorien zugeordnet sind. Diese ermöglichen die Anpassung der Konditionen, unter denen allgemeine Lebensdauerdaten ermittelt wurden, an die Referenzkonditionen des konkreten Bauwerks. In Tabelle 4-2 sind die sieben Einflussfaktoren (A bis G) mit Kategorien und Beispielen dargestellt.

Tabelle 4-2: Einflussfaktoren auf die Lebensdauer nach DIN ISO 15686-4 (2003)

Kategorie	Faktor	Faktorklasse	Beispiele
Bauteilqualität	A	Komponentenqualität	Herstellung, Lagerung, Transport, Material
	B	Konstruktionsqualität	Konstruktiver Schutz
	C	Ausführungsqualität	Einbau, Personal, Klimatische Bedingungen auf der Baustelle
Umgebung	D	Inneneinflüsse	Raumluft, Kondensation
	E	Außeneinflüsse	Standort, Klima, Luftverschmutzung
Gebrauchsbedingungen	F	Nutzungsintensität	Mechanische Einflüsse, Nutzungsart, Verschleiß
	G	Instandhaltungsqualität	Qualität und Häufigkeit, Zugänglichkeit

Ausgangsbasis des Verfahrens ist die Referenzlebensdauer der zu bewertenden Komponente *RSLC* (Reference Service Life of a Component), die sich auf ein Bauteil von durchschnittlicher Qualität unter durchschnittlichen Rahmenbedingungen bezieht. Die spezifische Lebensdauer einer Gebäudekomponente *ESLC* (Estimated Service Life of a Component) ermittelt sich durch Multiplikation der Referenzlebensdauer mit den modifizierenden Faktoren nach der folgenden Gleichung:

$$ESLC = RSLC \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \cdot G \quad (4.1)$$

Grundsätzlich erscheint die Vorgehensweise, die spezifischen Rahmenbedingungen mithilfe von Einflussfaktoren rechnerisch zu berücksichtigen als sehr sinnvoll. Jedoch macht die Normenreihe DIN ISO 15686 weder Angaben zu Referenzlebensdauern, noch zu spezifischen Werten der Faktoren. Daher wird vor allem die Ermittlung der einzelnen Faktorwerte A bis G immer eine gewisse Unsicherheit mit sich führen, da die Bedingungen auf denen die Lebensdauervoraussage basiert, im Allgemeinen unsicher und unvollständig sind. Ebenso kann die Basis für die Bestimmung der numerischen Werte der Faktoren

unzulänglich sein und keine akkurate Lebensdauervoraussage ermöglichen. Als Alternative zu dieser mathematischen Bestimmung kann eine qualitative Bestimmung der Faktoren durchgeführt werden (z. B. durch Einordnung der Faktorwerte in Kategorien wie „schlechter“, „wie der Referenzwert“ oder „besser“).

Hinsichtlich der Referenzlebensdauer sind laut DIN ISO 15686-6 (2004) folgende Datenquellen verwendbar:

- Angaben von Bauprodukterzeugern
- Gesammelte Erfahrungswerte
- Expertenbefragung mittels Delphi-Methode
- Materialwissenschaftliche Forschungsergebnisse (z. B. Korrosionsrate von verzinktem Stahl mit definierten Umwelteinwirkungen)
- Failure Mode Effects Analysis (FMEA)-Studien

Die Lebensdauerwerte dieser Quellen sind kritisch zu betrachten und können, wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, nicht ohne weiteres auf das zu bewertende Bauteil übertragen werden. Die Referenzlebensdauer ist eine zentrale Eingangsgröße, die mithilfe der modifizierenden Faktoren verkürzt oder verlängert wird. Um in Zukunft eine standardisierte Berechnung von Lebensdauern durchführen zu können, ist die Festlegung von einheitlichen Referenzlebensdauern dringend erforderlich, da diese die Grundlage für eine transparente Berechnung der spezifischen Bauteillebensdauern bilden.

Darüber hinaus stellt die fehlende Angabe von konkreten Werten für die Einflussfaktoren ein zentrales Problem hinsichtlich der Anwendung der Faktorenmethode dar. Theoretisch können Werte zwischen null und unendlich verwendet werden, wobei Werte größer eine Lebensdauer verlängernd und Werte kleiner eine Lebensdauer verkürzend auf das Bauteil wirken. Lediglich zwei Beispielelemente werden in der DIN ISO 15686 gezeigt, bei denen sich die einzelnen Faktorwerte zwischen 0,8 und 1,2 bewegen, so dass sich Lebenserwartungen im Bereich der 0,2-fachen bis 3,6-fachen Referenzlebensdauer ergeben. Da nach dem gewählten Ansatz (Gleichung (4.1)) alle Einflussfaktoren gleich gewichtet werden, müssen unterschiedliche Wichtungen der Einflüsse bereits innerhalb der Faktoren eingeflossen sein oder werden nicht berücksichtigt. Abhängigkeiten der Faktoren untereinander sind nicht zu erkennen, so dass auf eine Korrelationsbetrachtung verzichtet werden kann. Trotzdem scheint das Multiplikations-Verfahren der Faktorenmethode zunächst nicht vollkommen schlüssig. Je mehr Faktoren in die Betrachtung mit einfließen, desto variabler wird der zu ermittelnde spezifische Lebensdauerwert. Jedoch zeigt genau dieser Ansatz die hervorragende Variabilität der Faktorenmethode. Sie wird insbesondere dann als hilfreich angesehen, wenn zwei oder mehr Schädigungsfaktoren gemeinsam angreifen, um einen letztendlich größeren Einfluss zu erreichen, als jeder einzelne der Faktoren al-

lein. Neutrale Einflussfaktoren oder solche, zu denen keine Informationen vorliegen, erhalten den Standardwert 1,0. Alle weiteren Faktoren können sich je nach Einfluss entsprechend positiv oder negativ auswirken und somit zu einer Verlängerung oder Verkürzung der spezifischen Lebensdauer führen.

Aufgrund der bislang eher subjektiven Einschätzung von Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Bauteilen wäre ein Lösungsansatz, möglichst viele Einflussgrößen durch Indikatoren messbar zu machen und im Sinne der nationalen/internationalen Normung zu vereinheitlichen. Trotzdem würden viele Einflussgrößen subjektiv und nicht indizierbar bleiben, so dass auch weiterhin auf Erfahrungswerte aus der Praxis Wert gelegt werden muss. Einzelne Versuche der Anwendung bzw. Weiterentwicklung der Faktorenmethode wurden inzwischen veröffentlicht und werden hier kurz diskutiert.

Punkki (2006) berücksichtigt z. B. in seiner „Lebensdauerbemessung von Betonbauteilen“ Einzelwerte der Faktoren von über 5,0 und kann seine Basislebensdauer somit um ein Vielfaches erhöhen. Dieser Ansatz wird als sehr kritisch angesehen, denn Einzelfaktoren im Bereich von 4 bis 5, die anschließend gemäß der Faktorenmethoden noch miteinander multipliziert werden, erscheinen für übliche Randbedingungen nicht plausibel.

Aarseth und Hovde (1999) versuchen die einzelnen Faktoren nach DIN ISO 15686 über stochastische Methoden zu bestimmen und damit eine gewisse Aussagesicherheit zu erhalten. In ihrer „step-by-step“-Methode werden die Einzelfaktoren in +/- Jahreswerte umgerechnet, die die entsprechende Bauteillebensdauer je nach Einfluss verlängern oder verkürzen können. Somit werden die Einzelfaktoren nicht mehr multipliziert, sondern als Jahreswerte addiert oder subtrahiert. Dieser Ansatz erscheint schlüssig und strukturiert aufgebaut und die Umrechnung der Faktoren in Jahreswerte lässt auf einen Blick die Auswirkungen einzelner Einflüsse erkennen. Abhängigkeiten der Faktoren oder gegenseitiges Verstärken von Einflüssen kann nicht berücksichtigt werden, so dass die Methode eher konservative Ergebnisse mit geringer Bandbreite um die mittlere Lebensdauer liefert. Hintergrundinformationen zur Quantifizierung der verschiedenen Faktoren werden nicht gegeben, so dass auch bei Aarseth und Hovde (1999) die Bestimmung der Lebensdauern auf subjektiven Einschätzungen beruht.

Ein weiterer Ansatz zur Bestimmung von spezifischen Lebensdauern wird von Bahr & Lennerts (2010) in einer Wichtung der durch die DIN ISO 15686 vorgegebenen Faktoren in Haupt- und Nebenkriterien gesehen. Sie haben die Schwächen der Faktoren-Methode erkannt und versuchen die Hemmnisse hinsichtlich der Umsetzung in die Praxis zu beseitigen. Dazu werden klare Empfehlungen bezüglich der zu verwendenden Referenzlebensdauern gegeben und restriktive Vorgaben hinsichtlich der Höhe der Werte für die jeweiligen Einflussfaktoren gemacht. Durch eine zusätzliche Differenzierung der Einflussfaktoren in materialspezifische Kriterien ist im Idealfall eine genauere Berechnung der zu er-

wartenden Lebensdauer eines Bauteils möglich. Dies ist allerdings mit erheblichem Aufwand verbunden und würde sehr spezifisches Fachwissen erfordern, so dass Bahr & Lennerts (2010) zu einer Erstellung von Expertendatenblättern für einzelne Bauteile raten, um die Subjektivität der Bewertung möglichst einzudämmen.

4.5 Wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden

4.5.1 Einführung

In der Literatur gibt es eine große Anzahl verschiedener Verfahren für die Prognose der Lebensdauer anhand wahrscheinlichkeitstheoretischer Methoden. Insbesondere der CIB W080/RILEM TC 175-SLM-Verbindungsausschuss für Methoden zur Lebensdauervorhersage von Bauteilen und Bauelementen ist hier zu nennen. Das Ziel dieses Ausschusses ist das Zusammenstellen bestehender Methoden und die Entwicklung neuer Verfahren zur Lebensdauervorhersage von Bauteilen. Wie bereits in Kapitel 2 angedeutet, beschäftigen sich die meisten dieser Methoden mit nur einem bestimmten Bauteil bzw. einem einzigen Schädigungsmechanismus. Vor allem die Lebensdauer von Stahlbetonbauteilen, Beläge von Verkehrsbauwerken (insbesondere Start- und Landebahnen an Flughäfen) oder Bauteile aus Holz an Gebäuden (Fenster, Wandbekleidungen, etc.) wurden bislang auf Basis wahrscheinlichkeitstheoretischer Methoden untersucht. Die für die Berechnungen erforderlichen Variablen werden in vielen Fällen anhand von Versuchsdaten kalibriert. Leider gibt es nur sehr wenige öffentliche Datenbanken, so dass die jeweils ermittelten Modelle und Methoden für weitere Untersuchungen kaum zu verwenden sind.

Der Alterungsprozess an sich kann prinzipiell als stochastischer Prozess² angesehen werden, von dem die Haupteinflussgrößen bekannt sind. Die Auswirkungen der Einflüsse sowie die Ausprägung der einzelnen Einflussfaktoren in numerischer Form sind jedoch nicht explizit bekannt, so dass es zu erheblichen Streuungen im Alterungsverhalten von Bauteilen kommen kann.

4.5.2 Alterungsmodell nach Markov

Die einfachste Form der Markov-Modelle bilden die sogenannten Markov-Ketten-Modelle, die zur statistischen Beschreibung von Zustandsfolgen verwendet werden können. Entwickelt wurden sie von dem russischen Mathematiker Andrejewitsch Markov

² Ein stochastischer Prozess ist die mathematische Beschreibung von zeitlich geordneten, zufälligen Vorgängen. Sie werden in verschiedene Prozessklassen unterteilt, von denen die Markov-Prozesse am häufigsten zur Anwendung kommen. Weitere Prozesse sind z. B. Gauß-Prozesse oder Ito-Prozesse, die im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet werden.

(1856-1922). Das für Alterungsprozesse verwendete Markov-Modell ist ein stochastisches Modell, das sich durch mehrere Zufallsprozesse beschreiben lässt. Es werden verschiedene Alterungsstufen (Zustandsklassen) festgelegt, die von dem betrachteten Bauteil im Laufe der Nutzungsdauer durchlaufen werden. Die Zustandsverteilung des Bauteils im jeweils nächsten Zeitintervall hängt von der Verteilung im vorangegangenen Zeitintervall und von der Verweildauer in der entsprechenden Zustandsklasse bzw. in früheren Zustandsklassen, d. h. vom Alter ab. Als Wahrscheinlichkeitsverteilung der Alterung wird üblicherweise die Weibull-Verteilung verwendet.

$$P(X_{t+1} = j / X_t = i) = S_t(j) - S_t(i) = F_t(i) - F_t(j) \quad (4.2)$$

mit $F(i)$ Verteilungsfunktion Weibull-Verteilung
 $S(i)$ Überlebensfunktion $1-F(i)$ für Zustandsklasse i (und besser)

$$S_t(i) = \exp[-\exp(\alpha_i + \beta_0 + \delta \cdot \ln t)] \quad (4.3)$$

Es werden Überlebensfunktionen bzw. Übergangsfunktionen in den jeweils nächst schlechteren Zustand verwendet, so dass Informationen zum Alter bzw. Instandsetzungsjahr erforderlich sind. Die Differenz zwischen zwei Zustandsfunktionen j und i ergibt die Wahrscheinlichkeit für die Zustandsklasse j . Abbildung 4-1 zeigt das Alterungsverhalten eines Bauteils anhand von sieben Zustandsklassen.

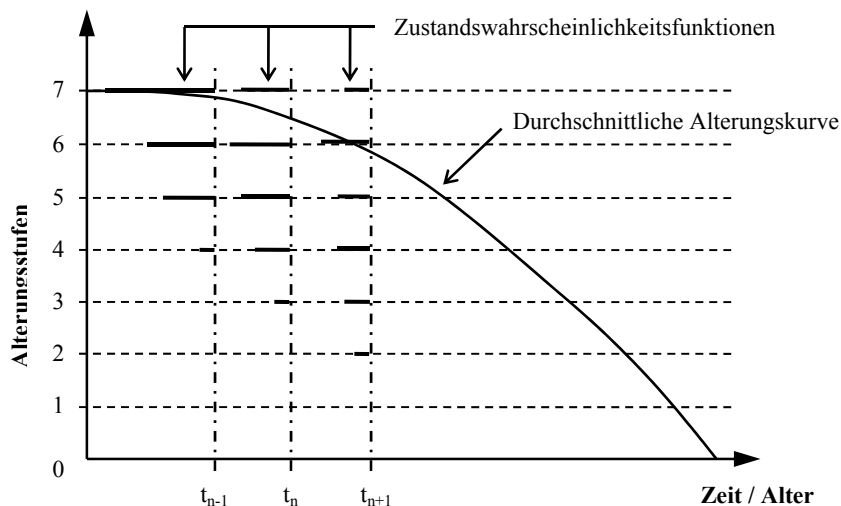


Abbildung 4-1: Alterungsmodell nach Markov

Das Modell von Markov wird sehr häufig angewandt, um das Alterungsverhalten von Bauteilen zu beschreiben, wobei die Zuverlässigkeit der Ergebnisse von den jeweiligen Eingangsparametern abhängt. Häufig liegen Daten nur für einzelne Schädigungsmechanismen vor, so dass das eigentliche Alterungsverhalten nur geschätzt werden kann. Trotzdem können durch eine iterative Herangehensweise und jährliche Zustandskontrollen sehr gute Näherungslösungen erzielt werden. Vor allem die Arbeiten von Leira et al. (1999),

Ansell et al. (2002) und Kaempfer et al. (2002), die sich alle an den Alterungsmodellen von Markov orientieren, sind hier zu nennen.

4.5.3 Weitere probabilistische Ansätze

Unbekannte Eingangsgrößen oder Unsicherheiten in der Datenbasis werden bei probabilistischen Methoden als Zufallsgrößen abgebildet. Dieser Ansatz wird hier besonders erwähnt, da er in vielen ingenieurmäßigen Berechnungsmethoden zum Einsatz kommt. Für die Abschätzung der Lebensdauer mit multivarianten Methoden können somit Zufallsgrößen anstatt von deterministischen Werten für Basisvariablen angesetzt werden (siehe Abbildung 4-2). Beispielhaft werden im Folgenden einige dieser Ansätze gezeigt:

Enright und Frangopol (1998) führen im Jahr 1998 Untersuchungen an Highway-Brücken in den USA durch. Das Ziel ihrer Forschung war eine zuverlässigkeitsbasierte Instandhaltungsstrategie. Dazu muss die Zuverlässigkeit von Stahlbetonbrückenträgern unter zeitvarianter Berücksichtigung der Belastung durch Verkehr und aggressiver Umweltbedingungen im Gegensatz zum Bauteilwiderstand ermittelt werden. Mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen konnten Ausfallwahrscheinlichkeiten berechnet und auf die Lebensdauer abgestimmte, optimale Instandhaltungszyklen entwickelt werden.

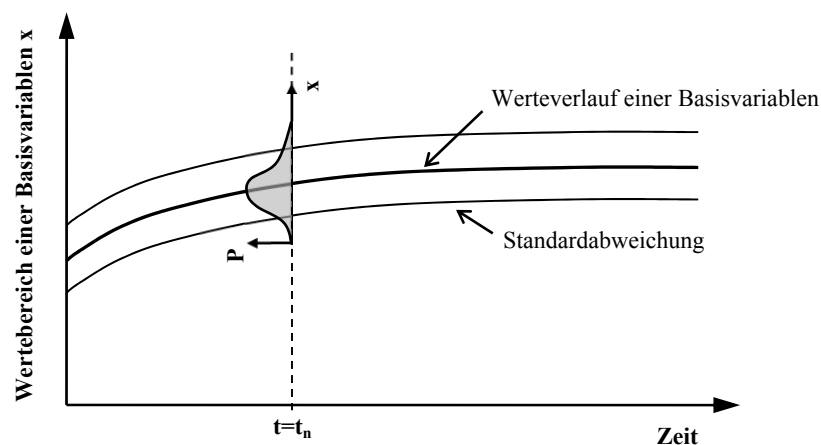


Abbildung 4-2: Mögliche Verteilung einer Basisvariablen über die Zeit

Das Modell von Flourentzou (1999) basiert zunächst auf vier verschiedenen Alterungskurven bzw. Alterungszuständen, in die die einzelnen Bauteile auf Basis von Zustandsanalysen (z. B. mit dem Programmsystem EPIQR) eingeordnet werden. Das von Flourentzou entwickelte Modell MEDIC („Prediction Method of probable Deterioration Scenarios and Refurbishment Investment Budgets“) berechnet die spezifische Lebensdauer eines Bauteils nicht als deterministischen Wert sondern als Wahrscheinlichkeitsverteilung. Es verbindet dabei Erfahrungswerte von Vergleichsgebäuden mit aktuellen Informationen aus der Zustandsanalyse des betrachteten Gebäudes. Dieses Modell ist eher dafür geeignet einen Überblick über einen großen Gebäudebestand und dessen Zustand zu be-

kommen und darauf aufbauend die künftigen Instandhaltungsmaßnahmen ableiten zu können. Rückschlüsse auf einzelne Bauteile oder spezifische Einsatzrandbedingungen können nicht getroffen werden. Die fehlende Erhebung der Einflussfaktoren gemäß DIN ISO 15686 lässt keine Schlussfolgerungen für künftige Planungs- und Bauprozesse zu.

Siemes entwickelte 1999 das probabilistische Lebensdauervorhersagemodell „Duracrete“, das sich speziell mit der Beschreibung physikalischer und chemischer Gesetzmäßigkeiten im Beton (z. B. Fortschreiten der Karbonatisierung oder Chlorideindringung) befasst. Es werden zunächst vier relevante Alterungsstufen, von der Depassivierung über Rissbildung und Abplatzungen bis hin zum Versagen des Bauteils, definiert. Durch die zeitabhängige Betrachtungsweise ist es möglich, eine mathematische Beziehung anzugeben, die für die chloridinduzierte Korrosion die notwendige Betondeckung als eine Funktion der Chlorid-Konzentration in Abhängigkeit der Zeit angibt. Die jeweiligen Variablen werden als Verteilungen definiert. Die Anwendung dieses Modells ist mit hohem Bewertungsaufwand (u. a. Bestimmung des Bauwerkszustands, Bestimmung relevanter Materialparameter etc.) verbunden und deshalb für Lebenszyklusanalysen von Gebäuden nur eingeschränkt verwendbar.

4.6 Softwaremodelle zur Lebensdauervorhersage

STRATUS: Das Softwareprogramm STRATUS Gebäude (2002) basiert auf dem Alterungsmodell von Schröder (1992), mit dem die Instandhaltung von Gebäuden geplant werden kann (siehe auch Abschnitt 3.4). Die Zustandsbewertung von 13 maßgebenden Bauteilen bildet die Grundlage für das Verfahren, wobei zwischen sieben Zustandsklassen differenziert werden muss. Die Software berechnet für jedes dieser Bauteile das relative Alter. Auf dieser Basis werden die notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen von den durchschnittlichen Lebenserwartungen dieser Bauteile abgeleitet. Das tatsächliche Alter anderer Bauteile kann jedoch stark von solchen durchschnittlichen Lebenserwartungen abweichen, wodurch das Verfahren kritisch zu bewerten ist.

TOBUS: Ähnlich der MEDIC-Methode werden in diesem Tool von Caccavelli & Gugerli (2002) aufbauend auf einer Zustandsanalyse, die um die Kriterien „Energiestandard, Innenraumqualität und Überalterung“ erweitert wurden, Lebensdauervorhersagen für Bürogebäude getroffen. Problematisch ist die Vermischung von wirtschaftlicher und technischer Lebensdauer, da hier nicht die Erhebung dieser Daten in Vordergrund steht, sondern ein Evaluierungsinstrument zur Abschätzung des entsprechenden Sanierungsaufwands.

INVESTIMMO (EPIQR): Im Jahr 2001 wurde das von der EU über drei Jahre finanzierte Forschungsprojekt INVESTIMMO (Caccavelli (2004)) ins Leben gerufen. Unter Zusammenarbeit von sieben europäischen Forschungseinrichtungen wurde versucht eine mittel-

bis langfristige Instandsetzungsplanung anhand der Ermittlung des Gebäudezustands zu entwerfen. Der Zustand einer Immobilie wird dabei anhand der 50 kostenintensivsten Bauteile und der Einordnung in vier Zustandsklassen erfasst. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Projekts Wahrscheinlichkeiten bezüglich des Zustandsverlaufs eines Bauteils bestimmt. Es wird bestimmt, wann und mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Bauteil den nächst schlechteren Zustand oder das Ende der Lebensdauer erreicht. Die Methode ist auf Wohnimmobilien beschränkt. Erst die Fortführung des Projektes als Softwareprogramm EPIQR (Energy Performance and Indoor Environmental Quality Retrofit) und die Erweiterung auf das Programm EPIQR+ macht die Bewertung von öffentlichen Verwaltungsgebäuden und Schulen möglich. Dieses Programm ist aktuell am weitesten verbreitet und bildet einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Ermittlungsaufwand. Eine echte Lebensdauervorhersage von Bauteilen ist jedoch nur auf Basis der hinterlegten Alterungskurven und Zustandsklassen möglich.

4.7 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels 4 werden einige wesentliche anwendungsorientierte Näherungsmethoden erläutert und kritisch hinterfragt. Aufgrund des geringsten Ermittlungsaufwands kommt die Kennwertemethode nach Abschnitt 4.2 noch immer am häufigsten zur Anwendung. Da die Kennwerte allerdings ohne Bezug zu spezifischen oder individuellen Randbedingungen und Eigenschaften eines Bauteils ermittelt werden, können diese nur als Anhaltswert dienen.

Das von Tomm, Rentmeister und Finke 1995 veröffentlichte Verfahren zur systematischen Erfassung und Steuerung von Instandhaltungsmaßnahmen wird in Abschnitt 4.3 näher erläutert. In diesem Verfahren werden die charakteristischen Merkmale eines Gebäudes erfasst und die in einem Katalog angegebenen „mittleren Lebensdauern“ der instandhaltungsrelevanten Bauteile über Abzugsfaktoren den spezifischen Verhältnissen angepasst. Anhand dieser Faktoren soll die mittlere Lebensdauerangabe nach oben oder unten korrigiert werden, wobei weder eine Rechenvorschrift, noch eine Vorgabe zur Größe oder Gewichtung der Faktoren vorgegeben wird.

Abschnitt 4.4 beschäftigt sich mit der Faktorenmethode nach DIN ISO 15686. Ähnlich wie das Verfahren von Tomm, Rentmeister und Finke (1995) versucht die in der DIN ISO 15686-4 (2003) definierte Faktorenmethode die tatsächlichen Umweltbedingungen einzelner Bauteile bei der Bestimmung der spezifischen Lebensdauer zu berücksichtigen. Diese Vorgehensweise wird als geeignet angesehen und als Basis für das in dieser Arbeit entwickelte Modell verwendet. Die Probleme der Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 liegen in der fehlenden Angabe von Referenzlebensdauern und der nicht vorhandenen Quantifizierung der Einflüsse.

In Abschnitt 4.5 werden verschiedene wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden zur Prognose von Lebensdauern vorgestellt. Derartige Verfahren beschäftigen sich größtenteils mit nur einem bestimmten Bauteil bzw. einem einzigen Schädigungsmechanismus, so dass sie für ein allgemeines Prognosemodell nicht geeignet sind.

Abschnitt 4.6 rundet die Analyse der Verfahren ab, in dem auf weitere Verfahren eingegangen wird, die inzwischen als EDV-Programme auf den Markt gekommen sind. Zum besseren Verständnis werden Hintergründe erläutert und Hinweise zur Anwendung der einzelnen Programme gegeben.

5 AUSWAHL UND GRUPPIERUNG DER BAUTEILE

5.1 Einführung

Die Grundlage der vorliegenden Forschungsarbeit liegt zunächst in einer sinnvollen Strukturierung relevanter Bauteile und in der Umsetzung in eine konsistente, einheitlich detaillierte und in der Praxis anwendbaren Liste mit Lebensdauerdaten und Einflussgrößen. Der Zusammenstellung wird die Einteilung der Bauteile nach den Kostengruppen der DIN 276-1 (2006) zugrunde gelegt.

Die DIN 276 regelt die Kostenermittlung im Bauwesen. Der bisher erschienene Teil 1 der Norm gilt für die Kostenplanung im Hochbau, insbesondere für die Ermittlung und die Gliederung von Kosten. Sie erstreckt sich auf die Kosten für Neubau, Umbau und Modernisierung von Bauwerken sowie die damit zusammenhängenden projektbezogenen Kosten. Für Nutzungskosten im Hochbau gilt die DIN 18960 (2008).

Zusammenhängende Kosten werden in DIN 276-1 (2006) in Kostengruppen zusammengefasst. Die Gliederung der Kosten erfolgt in drei Ebenen. In der ersten Ebene werden die Gesamtkosten in folgende sieben Kostengruppen gegliedert:

100	Grundstück
200	Herrichten und Erschließen
300	Bauwerk – Baukonstruktionen
400	Bauwerk – technische Anlagen
500	Außenanlagen
600	Ausstattung und Kunstwerke
700	Baunebenkosten

Jede Ebene wird hierarchisch in weitere zwei Ebenen aufgegliedert, so dass in der dritten Ebene bereits eine Untergliederung in einzelne Bauteile vorgegeben ist. Diese Untergliederung (siehe Anhang A) wird für die Gliederung der Bauelemente in der vorliegenden Arbeit verwendet und im weiteren Verlauf für die jeweiligen Untergruppen der Kosten-
gruppe 300 präzisiert.

5.2 Detaillierung und Gliederung der Bauelemente

Die Grundstruktur der Bauteilgliederung wurde bei der Bearbeitung dieses Projekts analog zur Gliederung der DIN 276-1 (2006) gewählt. Sämtliche Elemente der dritten Gliederungsebene von Kostengruppe 300 sind in der erstellten Bauteilliste zu finden (siehe Anhang C), auch wenn sie im weiteren Verlauf dieser Arbeit aufgrund der Datenmenge von über 1100 Einzelementen nicht alle in vollem Umfang untersucht werden konnten. Anschließend wurden Haupt- und Untergruppen gebildet, die zu einer weiteren Spezifi-

zierung des Bauteils beitragen. Die unterste Gliederungsebene ist die Objektebene bzw. die letzte Präzisierung des Bauteils. Mit diesen vier Ebenen lässt sich jedes Bauteil eindeutig beschreiben (siehe Abbildung 5-1).

1. Ebene	2. Ebene	3. Ebene	4. Ebene
Kostengruppe nach DIN 276 (3. Ebene)			
	Hauptgruppe		
		Untergruppe	
			Objekt/Bauelement

Abbildung 5-1: Gliederung der Bauteile

Die Zuordnung der einzelnen Bauteile zu den jeweiligen Kostengruppen wurde anhand der Anmerkungen in DIN 276-1 (2006) durchgeführt. Da diese Zuordnung nicht in allen Bereichen eindeutig ist, wurden kritische Bauteile nach baupraktischen Belangen sortiert und auf eine Ansammlung unter dem nach DIN 276-1 (2006) in jeder Kostengruppe vorhandenen Unterpunkt „Sonstiges“ verzichtet. Durch die gewählte Gliederung sind Doppelungen einzelner Bauelemente möglich und durchaus erwünscht. So können z. B. die Fliesen in einem Sanitärbereich eine deutlich größere Lebensdauer aufweisen als die Fliesen auf einem Balkon oder einer Terrasse. Selbst die Lebensdauer der Fliesen innerhalb eines Badezimmers kann zwischen Wand-, Decken- und Bodenfliesen differieren. Auch im Bereich von Dämmungen oder Wand- und Deckenverkleidungen sind derartige Redundanzen möglich.

5.3 Sammlung von Lebensdauerdaten

Nach der Gliederung der Bauteile ist die Durchführung einer umfassenden Literaturrecherche Grundvoraussetzung für die Erlangung von Lebensdauerdaten. Dazu muss zunächst die Fragestellung konkretisiert und abgegrenzt werden. Datensätze zur technischen Lebensdauer von Bauteilen der Kostengruppe 300 nach DIN 276-1 (2006) stehen im Vordergrund der Datenerhebung, wobei Angaben zur Nutzungsdauer von Bauelementen ebenfalls akzeptiert werden, da in der Literatur keine Abgrenzung zur technischen Lebensdauer festgestellt wurde. Ein strukturierter Aufbau der Fragestellung stellt einen wesentlichen Teil der Qualitätssicherung innerhalb der Literaturrecherche dar. Weiterhin sind ausreichende Fachkenntnisse erforderlich, um nicht nur das gefundene Expertenwissen richtig zu beurteilen, sondern v. a. um die eigene Leistung einer ständigen und selbstkritischen Überprüfung zu unterziehen. Im Rahmen der Recherche wurden daher nicht nur reine Datensammlungen zu Lebensdauern von Bauteilen in elektronischer und papiergebundener Form ausgewertet, sondern auch Normenwerke zu den einzelnen Bauteilen, Arbeiten zu Instandhaltung und Wartung sowie zusammenfassende Bücher über Facility Management und Nachhaltigkeit gesichtet. Hersteller von Bau- und Konstruktions-

produkten verfügen oftmals über interne Informationen zur Lebensdauer und Dauerhaftigkeit ihrer Produkte. Gelegentlich werden diese Daten der Öffentlichkeit z. B. in Produktdeklarationen oder auf Herstellerwebseiten zugänglich gemacht, wobei sich derartige Veröffentlichungen auf einzelne Bauteile beschränken und der Ermittlungsaufwand in keinem Verhältnis zum Mehrwert für diese Arbeit steht. Weitere mögliche Datenquellen stellen z. B. Bauordnungen, Arbeitsdokumente von Gremien, empirische Daten gleichartiger Objekte oder auch Urteile von Fachleuten dar. Grundsätzlich kann jede Informationsquelle genutzt werden, solange mögliche Fehlerquellen der verschiedenen Informationsquellen beachtet und gegebenenfalls dokumentiert werden. Bei der Bewertung der Datensätze ist das Vier-Augen-Prinzip genauso wesentlich wie das vorher festgelegte Procedere bei eventuellen Unstimmigkeiten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden unklare Datensätze in enger Zusammenarbeit mit mehreren Forschungspartnern diskutiert und je nach Qualität der Lebensdauerquelle bewertet. Der Prozess der Datenbeschaffung ist im nachfolgenden Schema (Abbildung 5-2) als Übersicht dargestellt. So können nach DIN ISO 15686-8 (2008) auch allgemeine Datensätze gefunden werden, die erst durch eine zusätzliche Quelle ergänzt werden müssen. Diese müssen anschließend bewertet und je nach Vollständigkeit und Transparenz für akzeptabel oder nicht akzeptabel befunden werden. Nicht akzeptable Datensätze werden gelöscht bzw. nicht in den Datenbestand aufgenommen, akzeptable Datensätze werden aufbereitet und der Bauteilliste zugeführt.

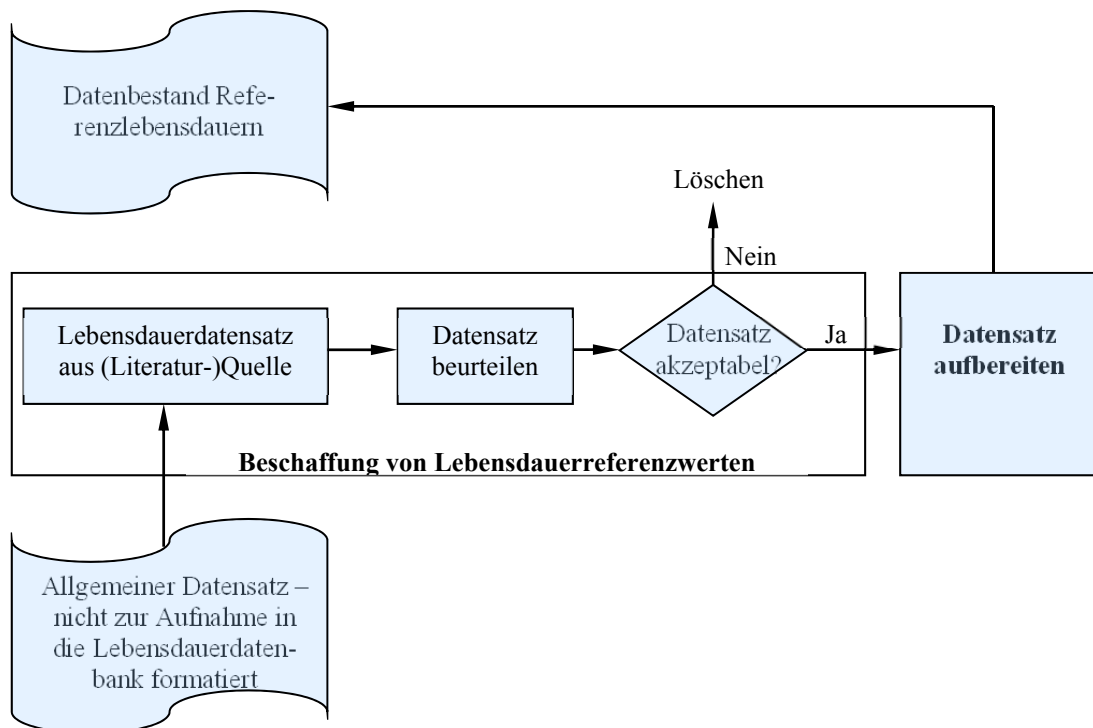


Abbildung 5-2: Prozess der Umformatierung von allgemeinen Daten zu Lebensdauerdaten nach DIN ISO 15686-8 (2008)

Im Rahmen der durchgeführten Literaturrecherche (siehe u. a. Tabelle 4-1) mussten bisweilen Abstriche hinsichtlich der Datenqualität hingenommen werden, da mehrfach Wiederholungen innerhalb der Quellen festgestellt wurden und Mittelwerte aus bereits bekannten Quellen nur bedingt als neue Werte akzeptiert werden konnten. Trotzdem sind einige dieser redundanten Quellen in die Untersuchung eingeflossen, da sie aufgrund der aktuellen Entwicklungen im Bereich der Lebensdauerforschung als wichtige Datenquellen wissenschaftlich anerkannt sind. Des Weiteren lässt sich nicht bei allen Literaturangaben nachvollziehen, welche Definition der Lebensdauer bzw. welche Randbedingungen der Datensammlung zugrunde liegen, so dass einige Werte aus der Literatur bewusst aussortiert werden mussten. Ein vollständiger Lebensdauerdatensatz enthält, neben einer allgemeinen Beschreibung des Materials (oder der Komponente), konkrete Angaben zur Vorgehensweise der Datenerhebung (siehe Kapitel 7). Weiterhin sind u. a. die Gebrauchskonditionen, die kritischen Eigenschaften eines Bauteils und dessen jeweilige Leistungsanforderungen von Interesse.

Insgesamt wurden durch die Literaturrecherche ca. 12.500 Datensätze in die Bauteilliste aufgenommen, so dass nahezu allen Komponenten der erstellten Liste bereits aktuelle Lebensdauerwerte zugeordnet werden konnten. In der folgenden Grafik ist eine Übersicht über die Anzahl der gefundenen Lebensdauerwerte abgebildet.

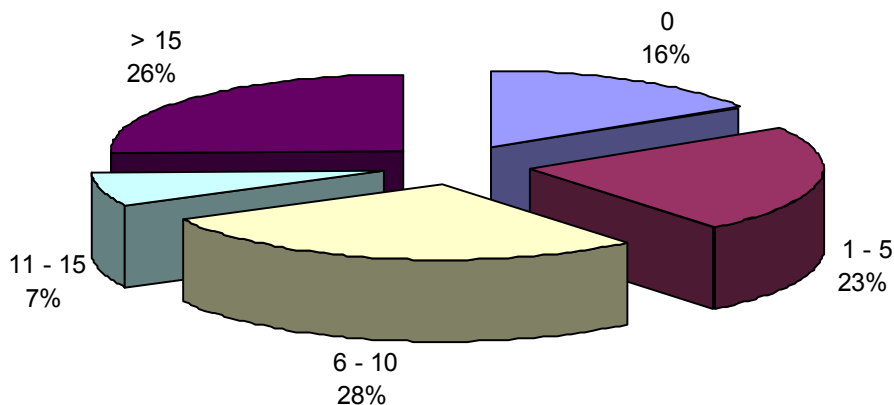


Abbildung 5-3: Anzahl der Lebensdauerdatensätze aus Literaturangaben je Bauteil

Die in Abbildung 5-3 dargestellte große Anzahl von Bauteilen ohne Angabe zur Lebensdauer (16% = 187) ist dem hohen Detaillierungsgrad und der Gruppierung vieler Bauteile geschuldet. So konnten oftmals Lebensdauerdaten auf Komponentenebene, aber nicht auf höherer Gliederungsebene gefunden werden, z. B. gibt es mehrere Angaben für Dichtprofile von Fenstern auf Komponentenebene (u. a. BMVBS (2001), Schweizer Eidgenossenschaft (2003), IFB (2004), IEMB (2006), BBSR (2009)), während es keine Daten zur Untergruppe Abdichtung und zur allgemeinen Hauptgruppe Fenster gibt. Das Aggregieren von Lebensdauerwerten auf höhere Gliederungsebenen wurde innerhalb der Literatur-

recherche zunächst nicht durchgeführt. Lediglich einige Standardbauteile wurden im Nachgang zur Datenerhebung anhand der Modellbildung in Abschnitt 5.6 zusammengesetzt, um einen Vergleich mit den Umfragewerten zu ermöglichen.

5.4 Identifikation maßgebender Einflussgrößen

5.4.1 Allgemeines

Im Zuge der Bearbeitung wurde der gewählte Betrachtungszeitraum auf 50 Jahre eingegrenzt, um eine Reduktion der Bauteilanzahl zu ermöglichen. Diesbezüglich wurde ein Bewertungskatalog erstellt, mit dem unter Berücksichtigung der maßgebenden Einflussgrößen, die relevanten Bauteile zusammengestellt werden konnten. Zu den Einflussfaktoren gehören die mittlere technische Lebensdauer unter Berücksichtigung des Variationskoeffizienten, die Erstinvestitionskosten unter Berücksichtigung der Folgekosten, die Ausfallwahrscheinlichkeit zusammen mit den Ausfallwirkungen, sowie die Robustheit, welche sowohl den Planungsaufwand im Vorfeld als auch das notwendige Fachwissen bei Wartung und Pflege berücksichtigt. Anhand von fünf Kategorien (A-E) werden die Einflussfaktoren auf die einzelnen Bauteile eingeteilt und nach ihrer Aussagekraft für diese Arbeit sortiert.

5.4.2 Lebensdauern mit statistischer Auswertung

Den wichtigsten Einflussfaktor auf die Relevanz der Kostengruppen stellt in dieser Arbeit die technische Lebensdauer der Bauteile dar. Auf Basis der mittleren technischen Lebensdauer aus der Literatur werden die Bauteile in fünf Kategorien, von kurzer Lebensdauer (Kategorie A ≤ 15 Jahre) bis zu sehr langer Lebensdauer (Kategorie E ≥ 80 Jahre), eingeteilt. Bauteile mit einer mittleren Lebensdauer von über 80 Jahren werden bei der Auswertung nicht berücksichtigt und fallen aus dem Betrachtungsrahmen. Die weitere Abstufung der Lebensdauerrelevanz wird nach folgendem Schema durchgeführt:

Tabelle 5-1: Abstufung der Lebensdauer

Kategorie:	A	B	C	D	E
Mittlere technische Lebensdauer [a]:	≤ 15	16 bis 30	31 bis 50	51 bis 80	≥ 80

Eine alleinige Auswertung der in der Literatur aufgeführten Lebensdauerdaten lässt noch keine Aussage über die Verwertbarkeit der Daten zu. Die Auswertung der Lebensdauern mit statistischen Kenngrößen ist zwingend erforderlich. Neben dem Mittelwert der technischen Lebensdauern wurden die Standardabweichung, der Variationskoeffizient und das 95%-Konfidenzintervall ausgewertet. Das 95%-Konfidenzintervall schließt einen Bereich um den geschätzten Wert des Parameters ein, der mit der festgelegten Wahrscheinlichkeit von 95% die wahre Lage des Parameters trifft. Ein zu breites Intervall weist auf einen zu

geringen Stichprobenumfang hin oder die untersuchte Datenreihe ist so variabel, dass nur durch eine unrealistisch große Stichprobe ein Konfidenzintervall von akzeptabler Breite erreicht werden könnte. Problematisch ist das Konfidenzintervall als Kenngröße trotzdem, da ein Konfidenzintervall für einen großen Lebensdauerermittelwert im Normalfall größer sein wird als für einen kleinen Mittelwert. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit als statistische Kenngröße für die Lebensdauerermittlung der Variationskoeffizient verwendet, der die Abweichung vom Mittelwert unter Berücksichtigung des Stichprobenumfangs als Normierung der Standardabweichung angibt. Sollte die Standardabweichung und somit auch der Variationskoeffizient gleich dem Wert 0 sein, weist dies auf eine relativ geringe Stichprobenanzahl hin (genau gleiche Lebensdauerschätzungen) und sollte zumindest auf Plausibilität untersucht werden. Für große Variationskoeffizienten $>0,25$ liegen stark streuende Werte vor, so dass diese Lebensdauern näher untersucht werden sollten. Kleinere Variationskoeffizienten $<0,10$ lassen auf einheitliche Lebensdauerangaben in der Literatur schließen. Für die Variationskoeffizienten werden die fünf Abstufungen nach Tabelle 5-2 unterschieden. Die Kategorie A beinhaltet den Sonderfall Variationskoeffizient = 0, der eine Überprüfung der Bauteile im Einzelfall induziert.

Tabelle 5-2: Abstufung der Variationskoeffizienten

Kategorie:	A	B	C	D	E
Variationskoeffizient [-]:	0	0,01 bis 0,10	0,11 bis 0,25	0,26 bis 0,5	$> 0,5$

Der Variationskoeffizient wird berücksichtigt, um aufgrund der statistischen Verteilung auch Lebensdauerwerte außerhalb des Betrachtungszeitraumes von 50 Jahren in die Betrachtung mit aufnehmen zu können, falls dies aufgrund eines großen Variationskoeffizienten erforderlich wird.

5.4.3 Erstinvestitions- und Folgekosten

Die aus Unternehmensicht wichtigste Einflussgröße auf die Bauteilauswahl sind die Kosten. Neben den Erstinvestitionskosten für den Bauherrn sind die Folgekosten für den Betreiber einer baulichen Anlage am Wesentlichsten. Die Erstinvestitionskosten für die einzelnen Kostengruppen lassen sich relativ zielsicher anhand verschiedener Quellen bestimmen. Zunächst wird hier eine Abschätzung der Baukosten nach BKI (2009) als prozentualer Anteil an den Gesamtkosten der Kostengruppe getroffen, um eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Bauteile unter Berücksichtigung üblicher Einbaumengen zu gewährleisten. Die Erstinvestitionskosten werden in die folgenden Prozentklassen untergliedert:

Tabelle 5-3: Abstufung der Erstinvestitionskosten

Kategorie:	A	B	C	D	E
Erstinvestitionskosten [%/-]:	> 5% / sehr hoch	3 bis 5% / hoch	2 bis 3% / mittel	1 bis 2% / gering	< 1% / sehr gering

Die Folgekosten sind in großem Maße von der geplanten bzw. gewählten Instandhaltungsstrategie (siehe Kapitel 3.5) abhängig. Eine Unterscheidung der Folgekosten in die einzelnen Grundmaßnahmen Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Verbesserung bzw. in die einzelnen präventiven und korrektiven Instandhaltungsstrategien ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Ebenso wenig kann eine Unterscheidung der Kosten in Materialaufwand und Arbeitsaufwand innerhalb der einzelnen Instandhaltungsmaßnahmen für alle Bauteile getroffen werden. Die Folgekosten werden daher qualitativ anhand von Erfahrungswerten in 5 Kategorien eingeteilt. Kategorie A beinhaltet alle Bauteile mit sehr hohen Wartungs- oder Reinigungskosten, die einer regelmäßigen, z. B. wöchentlichen Pflege bzw. Kontrolle bedürfen und einen erheblichen Aufwand erfordern. In Kategorie B werden Bauteile eingeordnet, bei denen die erforderliche regelmäßige Inspektion bzw. Wartung mit Aufwand verbunden ist oder in kleinen Zeitabständen erforderlich wird. In Kategorie C finden sich diejenigen Bauteile, bei denen eine regelmäßige Inspektion und Wartung erforderlich ist und die ohne viel Aufwand durchgeführt werden kann (z. B. jährlich). Bauteile der Kategorie D werden nur einer Sichtprüfung unterzogen oder erfahren eine Wartung in sehr großen Abständen, und Bauteile der Kategorie E erfahren keine Wartung oder Inspektion, da dies nicht erforderlich oder nicht möglich ist.

Tabelle 5-4: Qualitative Abstufung der Folgekosten

Kategorie:	A	B	C	D	E
Folgekosten [-]:	sehr hoch	hoch	mäßig	gering	sehr gering

Bauteile der Kategorie E mit sehr geringen Folgekosten und kleinem Erstinvestitionsanteil können aus der Betrachtung herausgenommen werden, da diese Elemente kostenmäßig nicht ins Gewicht fallen.

5.4.4 Risikobasierte Kenngrößen

Das Risiko eines Bauteilausfalls sowie dessen Ausfallwahrscheinlichkeit können als risikobasierte Kenngrößen zusammengefasst werden. Auf Basis von Erfahrungswerten lassen sich die betrachteten Bauteile in Risikokategorien einteilen, die damit die Notwendigkeit vorbeugender Instandhaltungsmaßnahmen induzieren. Bauteile mit geringem Ausfallrisiko (Kategorie E) können aus der weiteren Betrachtung entfallen. Bauteile der Kategorie A mit einem sehr wahrscheinlichen Ausfall sind Bauteile, bei denen selbst bei bester Wartung und Pflege jederzeit mit einem Ausfall gerechnet werden muss (z. B. EDV-Systeme, Jalousien, etc.). Kategorie B beinhaltet Bauteile, bei denen ein Ausfall nicht nur möglich,

sondern eher wahrscheinlich ist und die bei regelmäßiger Wartung und Pflege und sachgerechter Nutzung auch in eine der niedrigeren Gruppen eingeteilt werden könnten. In Kategorie C befinden sich alle Bauteile, bei denen ein Ausfall durchaus möglich sein kann, aber nicht sehr häufig vorkommt. Die Gruppen D und E bezeichnen abschließend die Bauteile, die sehr selten bzw. so gut wie nie komplett ausfallen. Bauteile der Kategorie E werden bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. Über die Elemente mit unwahrscheinlichem Ausfall nach Kategorie D wird jeweils im Einzelfall entschieden, ob diese durch ihre weiteren Kriterien in die Auswertung mit aufgenommen werden.

Tabelle 5-5: Qualitative Abstufung der Ausfallwahrscheinlichkeit

Kategorie:	A	B	C	D	E
Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls [-]:	sehr wahrscheinlich	wahrscheinlich	möglich	unwahrscheinlich	sehr unwahrscheinlich

Die Auswirkungen eines Ausfalls werden ebenfalls in 5 Kategorien eingeteilt. Kategorie A bedeutet katastrophale Auswirkungen mit Gefahr für Leib und Leben bzw. Einsturz von weiteren angeschlossenen Bauteilen oder Überflutung begehrbarer Räume. Bauteile mit einem Ausfall nach Kategorie B können zu einem Funktionsverlust von ganzen Konstruktionen führen, bergen aber keine direkte Gefahr für Leib und Leben. Kategorie C bedeutet, dass bei einem Ausfall nur das jeweilige Bauteil betroffen ist, ohne weitere Auswirkungen auf andere Bauteile oder Elemente. Ein Ausfall nach Kategorie D muss nicht sofort ausgebessert werden. Die Funktion bleibt weitgehend erhalten. Bei der nächsten planmäßigen Inspektion kann gewartet oder instandgesetzt werden. Bauteile der Kategorie E müssen evtl. gar nicht instandgesetzt werden. Ihr Versagen hat keine größeren Auswirkungen auf die Nutzung. Sie dürfen bei der weiteren Betrachtung vernachlässigt werden.

Tabelle 5-6: Qualitative Abstufung der Ausfallwirkung

Kategorie:	A	B	C	D	E
Auswirkungen eines Ausfalls [-]:	katastrophal	sehr ernst	ernst	bedeutend	unbedeutend

5.4.5 Robustheit und Fehleranfälligkeit

Eine weitere Kenngröße zur Identifizierung der maßgebenden Bauteile lässt sich unter dem Begriff der Robustheit zusammenfassen, wobei die Robustheit als Fähigkeit des Bauteils, seine Funktion auch bei schwankenden Umgebungsbedingungen aufrechtzuerhalten zu verstehen ist. Angelehnt an die Risikomatrix von Klingenberg (2007) lässt sich eine Robustheitsmatrix erstellen, in die der Planungsaufwand vor der eigentlichen Nutzungsphase und das notwendige Fachwissen bzw. die Fehleranfälligkeit während des Betriebs des Gebäudes eingehen. Nicht selten führen falsche Nutzung bzw. schlechte Be-

dienung durch eigenes Servicepersonal zu einem erhöhten Aufwand oder gar zum Ausfall von einzelnen Bauelementen.

Robustheit / Fehleranfälligkeit eines Bauteils		Fehleranfälligkeit im Betrieb				
		A – sehr hoch	B – hoch	C – normal	D – gering	E – sehr gering
Planungsaufwand vor Inbetriebnahme	A – sehr hoch	AA	AB	AC	AD	AE
	B – hoch	BA	BB	BC	BD	BE
	C – üblich	CA	CB	CC	CD	CE
	D – gering	DA	DB	DC	DD	DE
	E – sehr gering	EA	EB	EC	ED	EE

Legende: Dunkle Einfärbung - wird zur weiteren Bewertung nicht empfohlen
 Blaue Einfärbung - sollte in die Bewertung aufgenommen werden
 Helle Einfärbung - muss zwingend in die Bewertung aufgenommen werden

Abbildung 5-4: Robustheitsmatrix angelehnt an Klingenberg (2007)

Der Planungsaufwand vor Inbetriebnahme wird in 5 Kategorien von sehr hoch bis sehr gering unterteilt. Sehr hoher Planungsaufwand ist nur bei speziellen Bauteilen in besonders hochwertigen Räumen, z. B. OP-Ausstattung angedacht, so dass nur wenige Bauteile in Kategorie A zu finden sind. In Kategorie B finden sich alle Bauteile, die von üblichen Bauweisen abweichen oder einen etwas höheren Planungsaufwand erfordern. Diese Einschätzung ist sehr subjektiv geprägt und kann evtl. um eine Klasse nach oben oder unten geschoben werden. Bauteile der Kategorien C und D können als Standardbauteile mit üblichem oder etwas geringerem Planungsaufwand zusammengefasst werden. Hier sind keine größeren Aufwendungen zu erwarten. Der Einsatz der Bauteile bzw. deren Bauweise wird als bekannt vorausgesetzt. In Kategorie E sind abschließend nur Bauteile zu finden, die mit sehr geringem Planungsaufwand verbaut werden, wie Schüttungen oder Anstriche.

Die Fehleranfälligkeit im Betrieb berücksichtigt nicht nur Schäden, die durch falsche Nutzung im Betrieb entstanden sein können, sondern soll auch eine gewisse Robustheit gegenüber Reinigungspersonal oder falsche Bedienung beinhalten. Auch diese Kenngröße wird in 5 Kategorien unterteilt. Bauteile der Kategorie A sind sehr anfällig für Bedienungsfehler oder falsche Nutzung, wie z. B. Sonnenrollos, OP-Geräte oder EDV-Anlagen. Kategorie B beinhaltet Bauteile mit einer erhöhten Anfälligkeit, wie Beschläge von Türen und Fenstern, Abdichtungen oder sonstige elektrische Geräte. Des Weiteren

fallen alle Systembauteile, wie z. B. Wärmedämmverbundsysteme unter diese Kategorie. In Kategorie C fallen alle Bauteile mit üblicher Nutzung und geringer Komplexität. Geringe oder sehr geringe Fehleranfälligkeit der Kategorien D und E gilt für alle Bauteile, die selten oder nie gewartet werden müssen und keine echte Abnutzung erfahren.

Planungsaufwand und Fehleranfälligkeit sind sehr weiche Kriterien mit einer ausschließlich subjektiven Einschätzung. Daher werden diese Punkte zwar in die Auswertung mit aufgenommen, es werden aber keine Bauteile aufgrund schlechter Bewertung bei ausschließlich diesen Punkten aus der Bewertung genommen. Planungsaufwand und Fehleranfälligkeit sind nur als Hilfskriterien für mäßig bewertete Bauteile nach den anderen Kriterien anzusehen.

5.5 Auswahl und Gruppierung der maßgebenden Bauteile

Aufbauend auf den in Abschnitt 5.4.1 bis 5.4.5 genannten Kriterien werden die einzelnen Komponenten der Bauteilliste bewertet und nach ihrer Wichtigkeit sortiert. Das maßgebende Kriterium ist die mittlere technische Lebensdauer aus Literaturangaben, so dass Bauteile mit einer mittleren Lebensdauer über 80 Jahre für die vorliegende Arbeit nicht näher betrachtet werden und direkt aus der Betrachtung entfallen können. Bauteile der Lebensdauerkategorie D mit einer Lebensdauer zwischen 50 und 80 Jahren werden einzeln untersucht und je nach Variationskoeffizient (groß) beibehalten oder (klein) ebenfalls aus der Liste gelöscht. Alle weiteren Bauteile mit mittlerer technischer Lebensdauer von unter 50 Jahren werden zunächst in die Bauteilliste aufgenommen. Anschließend erfolgen Sortierungen nach den Punkten Ausfallwahrscheinlichkeit und Ausfallauswirkungen, wobei für diese Kenngrößen Bauteile mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit der Kategorien D und E, sowie solche mit Ausfallauswirkungen der Kategorie E überwiegend entfallen können. Danach werden die Bauteile nach monetären Gesichtspunkten und nach Robustheit sortiert, um eine geeignete Auswahl zu treffen. Nach Abwägung aller Einflussgrößen ergibt sich eine Liste von Key-Komponenten (siehe Anhang C), die im Sinne einer fachlichen Zuordnung, unter Berücksichtigung der Gliederung nach DIN 276-1 (2006) in 10 Bauteilgruppen eingeteilt werden kann. Folgende Gruppen werden festgelegt, die im Rahmen einer Expertenumfrage näher untersucht werden:

- | | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| 1. Fenster | 6. Bodenbeläge und Bodenaufbauten |
| 2. Türen und Tore | 7. Deckenbekleidungen |
| 3. Fassaden und Anstriche | 8. Dachfenster |
| 4. Sonnenschutz | 9. Dachbeläge |
| 5. Innenwandbekleidungen | 10. Dachentwässerung |

Eine Beschreibung der einzelnen Bauteilgruppen mit Untergruppen und Elementen ist in Anhang D zusammen mit möglichen Schädigungsmechanismen zu finden. Zusammenge-

setzte Bauteile aus einzelnen Schichten oder unterschiedlichen Materialien erfordern eine differenzierte Betrachtung, die im folgenden Abschnitt 5.6 erläutert wird.

5.6 Modellbildung und Detaillierung

Die Zusammensetzung von hybriden Bauteilen lässt sich in verschiedene Schichten bzw. Ebenen aufteilen. Es muss zwischen sehr langlebigen und eher kurzlebigen Ebenen unterschieden werden, die möglichst demontierbar miteinander verbunden sein müssen. Grundsätzlich können zwei verschiedene Arten von Verbindungen definiert werden (siehe Abbildung 5-5):

- Einzelverbindungen - Verbindung von einzelnen Bauteilen untereinander
- Flächenverbindungen - Verbindung von angrenzenden Bauteilschichten

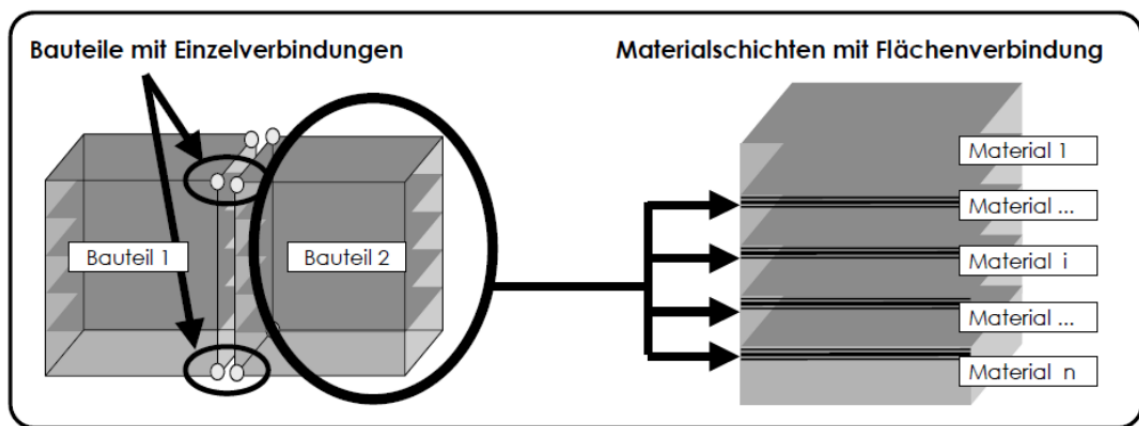


Abbildung 5-5: Schichtenmodell nach Reiche (2001)

Als klassische Schichtenmodelle sind beispielhaft die Wand- und Deckenaufbauten mit Flächenverbindungen zu nennen. Schichtenmodelle mit Einzelverbindungen lassen sich analog durch Hierarchiemodelle abbilden, die bislang eher aus anderen Bereichen als der Baukonstruktion bekannt sind (z. B. Gebäudetechnik, Maschinenbau). Hierarchiemodelle haben Vorteile bei der Darstellung von Abhängigkeiten und lassen ein Ablesen von Ergebnissen auf unterschiedlichen Genauigkeitsstufen zu. Abbildung 5-6 zeigt ein allgemeines hierarchisches Bauteilmodell, in welchem die verschiedenen Bauteilkomponenten durch je ein Modellelemente visualisiert werden. Die Modellelemente bestehen aus der Komponentenbezeichnung und einem Wertepaar, welches die Lebensdauer in Jahren bzw. die Dauer bis zum (Teil-)Austausch und den entsprechenden Reinvestitionsprozentsatz beinhaltet. Für Komponenten, die ohne größere Instandsetzung nur „im Ganzen“ ausgetauscht werden können, steht dort die mittlere technische Lebensdauer in Jahren und 100% Reinvestition. Je nach Kalkulationsphase und Detaillierung kann auf unterschiedlichen Hierarchiestufen kalkuliert werden. Liegen z. B. in einer frühen Phase der Kalkulation noch keine genaueren Informationen vor, müssten nach x_0 Jahren y_0 % der Erstinves-

titionskosten für das Bauteil aufgebracht werden. Hat man in einer späteren Phase bereits genauere Informationen zur Art des Bauteils und zu dessen Bestandteilen, kann auf eine der nächsten Ebenen weiter kalkuliert werden. Die Kostenanteile y_1 (nach x_1 Jahren), y_2 (nach x_2 Jahren) und y_3 (nach x_3 Jahren) müssen zusammen die y_0 % der Erstinvestitionskosten nach x_0 Jahren ergeben.

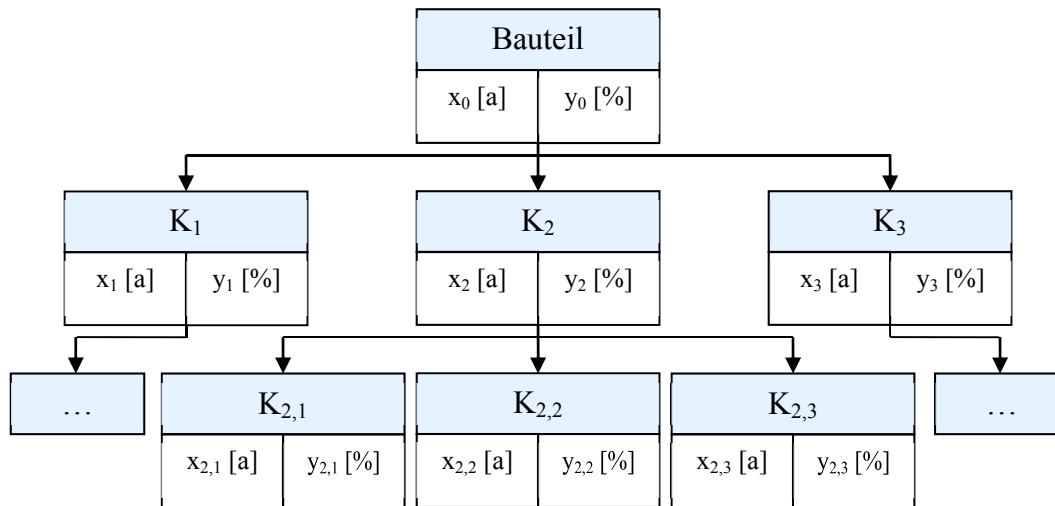


Abbildung 5-6: Allgemeines hierarchisches Bauteilmodell

Der Detaillierungsgrad, welcher in Kapitel 5.2 bereits beschrieben wurde, ist Grundlage für alle Modelle, auch wenn die Detaillierung im Zuge der Anwenderfreundlichkeit bei einigen Bauteilen reduziert werden musste. Die endgültige Ausgestaltung der Kostenanteile muss durch den Anwender erfolgen und kann derzeit nur als Vorschlag angesehen werden, der nicht in allen Bereichen ausreichend belegt werden kann. Die in den Modellen dargestellten Kostenanteile beruhen auf Berechnungen der Lebenszykluskosten mit dem am Institut für Massivbau der TU Darmstadt entwickelten Programm „baulocc“ (Herzog (2005)). Ausgearbeitete Modelle einzelner Standardbauteile sind beispielhaft im Anhang E zu finden.

5.7 Lösbarkeit von Schichten

Ein wichtiger Aspekt bei der Betrachtung der Lebensdauer ist der Einfluss der Lösbarkeit der im Fall von Instandsetzungsarbeiten betroffenen Bauteilschichten. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Bauteilschicht als „lösbar“ angesehen, wenn die schadhafte Bauteilschicht ohne Beschädigung intakter Bauteilschichten austauschbar ist. Als „bedingt lösbar“ gilt ein Bauteil, wenn es nur durch Zerstörung von Verbindungsmitteln zu lösen ist (z. B. nicht demontierbare Verschraubung). Kann eine schadhafte Bauteilschicht nur durch Zerstörung intakter Bauteilschichten ausgetauscht werden, wird sie als „nicht lös-

bar“ definiert. Dabei ist zu beachten, dass besonders bei Nutzschichten mehrere Möglichkeiten zutreffen können. Falls nur der Fußbodenbelag ausgetauscht werden muss, bleibt die Lebensdauer des angrenzenden Estrichs üblicherweise gleich, d. h. der Fußbodenbelag ist lösbar. Ist jedoch eine defekte darunterliegende Bauteilschicht auszutauschen (z. B. Trittschalldämmung, Installationen), dann kann die Instandsetzung nur durch Zerstörung der darüberliegenden Schichten (z. B. Fußbodenbelag etc.) erfolgen, d. h. nicht lösbar.

Im Rahmen der Modellbildung hybrider Bauteile wird die voraussichtliche Lebensdauer unter Einbeziehung der Lösbarkeit auf verschiedene Arten bestimmt. Lösbare Schichtgruppen bekommen die berechnete voraussichtliche Lebensdauer zu 100% zugewiesen. Die voraussichtliche Lebensdauer einer nicht lösbaren Schichtgruppe wird durch die niedrigste voraussichtliche Lebensdauer der darunterliegenden Schichtgruppen begrenzt (z. B. Estrich mit einer Lebensdauer von 60 Jahren wird durch die kürzere Lebensdauer der darunterliegenden Trittschalldämmung von 50 Jahre auf diese begrenzt). Falls eine Schichtgruppe je nach Eingriffstiefe lösbar bzw. nicht lösbar sein kann oder der Wiedereinbau gebrauchter Bauteile nicht sinnvoll erscheint, wird die niedrigste Lebensdauer aus den zwei möglichen Instandsetzungsszenarien festgelegt.

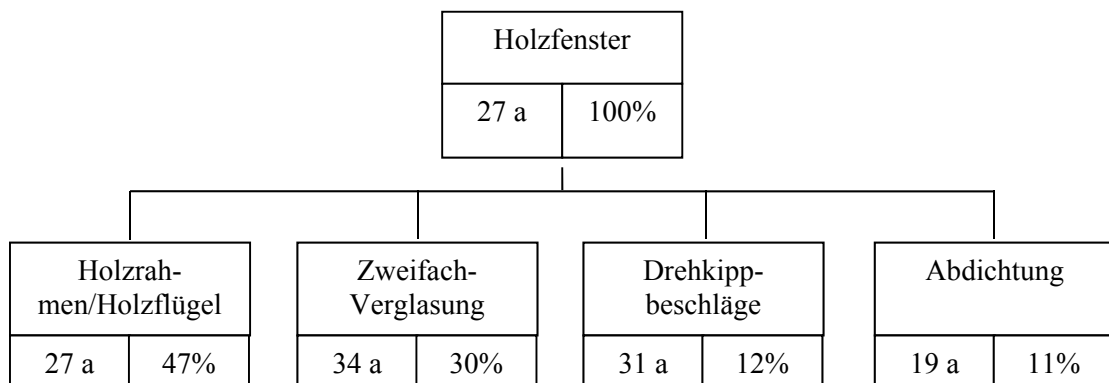


Abbildung 5-7: Holzfenster im Hierarchiemodell

Im Anschauungsbeispiel Holzfenster (Abbildung 5-7) wird durch die voraussichtlich kürzere Lebensdauer der Holzrahmen bzw. Holzflügel mit 27 Jahren, die Lebensdauer der Zweifachverglasung (34 Jahre) und der Drehkippbeschläge (31 Jahre) auf 27 Jahre begrenzt. Die Lebensdauer der Abdichtung hat keinen Einfluss auf die Lebensdauer des Gesamtbauteils, da die Abdichtung unabhängig von den sonstigen Fensterkomponenten getauscht werden kann. Weitere Untersuchungen zur Lösbarkeit von Schichten werden in Abschnitt 9 beispielhaft beschrieben. Dort werden neben den entsprechenden Lebensdauern auch Umweltwirkungen und ökonomische Aspekte der Lösbarkeit untersucht.

5.8 Zusammenfassung

Die Begrenzung der Bauteilanzahl auf ein sinnvolles Maß stellt einen Kompromiss zwischen Untersuchungsaufwand und Genauigkeit bzw. Praxistauglichkeit dar. Kapitel 5 beschreibt das Auswahlverfahren der maßgebenden Bauteile sowie die Gliederung und den Grad der Detaillierung. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden neben Lebensdauerdaten und deren Randbedingungen auch weitere Bauteilvarianten und Materialien in die vorhandene Bauteilliste aufgenommen. In Abschnitt 5.3 ist das Vorgehen der Literaturrecherche unter Berücksichtigung der Datenqualität nach DIN ISO 15686-8 (2008) dargestellt. Die Auswahl und anschließende Gruppierung der maßgebenden Bauteile ist in den Abschnitten 5.4 und 5.5 ausgeführt. Diesbezüglich wurde ein Bewertungskatalog erstellt, mit dem unter Berücksichtigung der maßgebenden Einflussgrößen, die relevanten Bauteile zusammengestellt werden konnten. Zu den Einflussfaktoren gehören die mittlere technische Lebensdauer unter Berücksichtigung des Variationskoeffizienten, die Erstinvestitionskosten unter Berücksichtigung der Folgekosten, die Ausfallwahrscheinlichkeit zusammen mit den Ausfallwirkungen, sowie die Robustheit, welche sowohl den Planungsaufwand im Vorfeld als auch das notwendige Fachwissen bei Wartung und Pflege berücksichtigt. Aufbauend auf diesen Kriterien wurden die einzelnen Komponenten der Bauteilliste bewertet und nach ihrer Wichtigkeit ausgewählt, so dass sich eine Liste von ca. 400 Bauteilen ergab (siehe Anhang H), die im Sinne einer fachlichen Zuordnung als Vorbereitung für eine spätere Datenerhebung in zehn Bauteilgruppen eingeteilt wurde. Die abschließenden Abschnitte 5.6 und 5.7 beschäftigen sich mit der Modellbildung von zusammengesetzten Bauteilen und deren Lösbarkeit im Fall von unterschiedlichen Lebensdauern der Einzelschichten. Dabei wird die voraussichtliche Lebensdauer von zusammengesetzten Bauteilen unter Einbeziehung der Lösbarkeit auf verschiedene Arten bestimmt. Während lösbare Schichtgruppen die berechnete voraussichtliche Lebensdauer zu 100% zugewiesen bekommen, wird die Lebensdauer von nicht lösbaren Schichtgruppen durch die niedrigste voraussichtliche Lebensdauer der angrenzenden Schichtgruppen begrenzt. Derartige Einflüsse finden in der Modellbildung Berücksichtigung.

6 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE LEBENSDAUER

6.1 Einführung

Das Alterungsverhalten eines Gebäudes ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Einige wirken sich funktionsmindernd aus und beschleunigen somit den Abnutzungsprozess, andere Faktoren verzögern die Alterung von Bauteilen und verlängern dadurch deren Lebensdauer.

Grundsätzlich kann zwischen Einflüssen auf das materielle Alterungsverhalten und Einflüssen auf die immaterielle Alterung eines Bauteils unterschieden werden. Die in dieser Arbeit betrachtete technische Lebensdauer eines Bauteils wird durch die materielle Alterung bestimmt, während die wirtschaftliche Lebensdauer häufig von den immateriellen Einflussfaktoren abhängt. Wie bereits in Abschnitt 4.4 beschrieben, gibt die DIN ISO 15686 sieben Einflussklassen vor, die für die Bestimmung der technischen Lebensdauer eines Bauteils anhand der Faktorenmethode (Gleichung (4.1)) zu berücksichtigen sind. Unter diesen sieben Klassen werden im Folgenden alle materiellen Einflussgrößen zusammengefasst und erläutert, während die Einflüsse der immateriellen Alterung lediglich kurz vorgestellt werden.

Des Weiteren wird ein kurzer Einblick in das materialspezifische Alterungsverhalten gegeben, wobei aufgrund des enormen Umfangs und der Komplexität dieser Thematik kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden kann. Ziel ist es vielmehr hinsichtlich dieser Thematik zu sensibilisieren und offensichtliche Auswirkungen und materialspezifische Risiken darzustellen.

6.2 Materielle Einflussfaktoren nach DIN ISO 15686

6.2.1 Allgemeines

Mit den materiellen Einflüssen werden diejenigen Faktoren beschrieben, die das Alterungsverhalten des Bauteilmaterials maßgeblich beeinflussen. Im Gegensatz zu den immateriellen Einflüssen, die ein eher subjektives Setzen von Abnutzungsgrenzen erfordern, wirken sich die materiellen Einflüsse direkt auf den Abnutzungsvorrat von Bauteilen aus.

Nach DIN ISO 15686 lassen sich die in Tabelle 6-1 dargestellten Einflussklassen unterscheiden, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden und für die praktische Anwendung in weitere Subfaktoren unterteilt sind.

6 Einflussfaktoren auf die Lebensdauer

Tabelle 6-1: Einteilung der Einflüsse auf die Lebensdauer mit Subfaktoren

Kategorie	Faktor	Faktorklasse	Subfaktoren
Bauteilqualität	A	Komponentenqualität	Produktqualität, Erfahrungswerte, Komplexität, Nachhaltigkeit
	B	Konstruktionsqualität	Konstruktiver Schutz, Planungsqualität, Komplexität, Qualitätssicherung
	C	Ausführungsqualität	Projektmanagement, Einbaubedingungen, Komplexität, Qualitätssicherung
Umgebung	D	Innenräumliche Umgebungsbedingungen	Raumluftbedingungen, Temperatur, Chemischer Angriff, Biologischer Angriff
	E	Außenräumliche Umgebungsbedingungen	Standort, Sonne, Feuchtigkeit, Temperatur, Biologischer Angriff, Erschütterungen, Wind
Gebrauchsbedingungen	F	Nutzungsintensität	Mechanische Einflüsse, Nutzungsart, Verschmutzungs-/Reinigungsintensität, Optischer Anspruch, aktualisierte Gebäudeinformationen
	G	Instandhaltungsniveau	Instandhaltungszyklus, Instandhaltungsqualität, Gebäudedokumentation, Zugänglichkeit

6.2.2 Komponentenqualität (Faktor A)

6.2.2.1 Allgemeines

Bauteile von Gebäuden besitzen unterschiedliche Eigenschaften. Diese können u. a. durch normative Regelungen, Herstellungsprozesse oder die Leistungsbeschreibungen von Planern bestimmt sein. Werden diese Eigenschaften nicht erfüllt, die Baustoffe aber dennoch eingebaut, verkürzt sich häufig die technische Lebensdauer der betroffenen Bauteile aufgrund erhöhter Schadensanfälligkeit. Das Material und die Funktion eines Bauteils bestimmen zunächst die durchschnittliche Lebensdauer (*RSL*). Ein qualitativ hochwertiges Bauteil kann die Lebensdauer verlängern, während ein qualitativ schlecht hergestelltes Bauteil die Lebensdauer durchaus stark verkürzen kann.

Baustoffe unterliegen darüber hinaus grundsätzlich der Alterung durch Materialermüdung, Schwinden oder Korrosion. Entsprechendes gilt für verwendete Produkte wie Fertigteile, maschinentechnische Anlagen oder Einrichtungsgegenstände. Auch der Transport und die Lagerung auf der Baustelle muss bei einer Lebensdaueranalyse mit betrachtet werden. Hierbei ist wichtig zu wissen, wie das Bauteil zur Baustelle transportiert und wie es gelagert wird. Selbst das Alter des Bauteils ist dabei von Bedeutung. Wird z. B. ein Blech so gelagert, dass durch Säge- oder Schweißarbeiten Späne oder Funken in Berührung mit dem Blech kommen, kann Flugrost das Bauteil schädigen, mit der Folge dass die Lebensdauer des Bauteils verkürzt wird.

6.2.2.2 Produktqualität

Hersteller von Bauprodukten benötigen für die Markteinführung neuer Produkte eine CE-Kennzeichnung. Die wesentlichen Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie werden

nicht in Hinblick auf das Produkt selbst, sondern auf Bauwerksebene definiert. Ein CE-Kennzeichen wird nur erlangt, wenn das Bauprodukt den zugehörigen harmonisierten Normen, Europäischen Technischen Zulassungen oder anerkannten nicht harmonisierten technischen Spezifikationen entspricht. Folglich erklärt der Hersteller mit der CE-Kennzeichnung für sein Produkt, alle Anforderungen der zugehörigen technischen Spezifikationen sowie das Konformitätsbewertungsverfahren zu erfüllen. Über die Normen hinausgehende verbesserte Produkteigenschaften (z. B. Schutzschichten, Anstriche, etc.) wirken sich üblicherweise direkt auf die für das Bauteil potenzielle Lebensdauer aus. Billigprodukte und „Noname“-Artikel können zwar im Einzelfall durchaus ähnliche Lebensdauern erreichen wie ein teures Qualitätsprodukt, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit dafür eher gering.

6.2.2.3 Erfahrungswerte und Testberichte

Erfahrungswerte zu Bauelementen sind üblicherweise rein subjektiv und nur als Näherungswerte zu gebrauchen. Trotzdem spielen Erfahrungswerte für die Produktauswahl eine wichtige Rolle, da bislang nur zu wenigen Bauprodukten wissenschaftliche Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit und zu möglichen Lebensdauern vorhanden sind. Schnellalterungstests sind eine Möglichkeit, um auch neuere Produkte mit einer angenäherten Langzeiterfahrung zu bestätigen. Üblicherweise werden die Bauelemente bei diesen Tests Simulationszyklen in Klimakammern ausgesetzt, bei denen sich periodisch Temperatur und Luftfeuchtigkeit während der Prüfung ändern. Somit können Rückschlüsse auf das Alterungsverhalten in der Praxis gezogen werden.

6.2.2.4 Komplexität des Bauteils

Unter dem Stichwort Komplexität des Bauteils sind verschiedene Einflussgrößen zusammengefasst. Dazu gehören die Verarbeitbarkeit des Bauteils, die Fertigungstechnik (Herstellungsverfahren) und die Kompatibilität mit anderen Bauteilen oder Modulen. Es werden sowohl die notwendige Qualifikation des Fertigungspersonals, als auch das Bauteil selbst bewertet, um eine Aussage über die mögliche Lebensdauer treffen zu können. Hochkomplexe, schwierig zu verarbeitende Sonderkonstruktionen schneiden dabei zunächst schlechter ab als ein einfach zu verarbeitendes, etabliertes Großhandelsprodukt, auch wenn deren Lebensdauern durchaus vergleichbar sein können.

6.2.2.5 Verfügbarkeit von Komponenten

Die Verfügbarkeit des Bauteils oder möglicher Ersatzteile ist ein wichtiger Faktor bei der Lebensdaueranalyse. Sollte eine Instandhaltung aufgrund nicht mehr vorhandener Ersatzteile nur bedingt möglich sein, kann dies zu einer deutlichen Verkürzung der Lebensdauer führen.

6.2.3 Entwurfsqualität (Faktor B)

6.2.3.1 Allgemeines

Eine mangelhafte Bauplanung ist häufig durch eine geringe Leistungsfähigkeit des Planers, durch einen nicht funktionsgerechten Entwurf oder fehlendes Qualitätsmanagement gekennzeichnet. Insbesondere bei der Ausführungsplanung sind die anerkannten Regeln der Technik zu beachten, die sich aus zahlreichen Normen, Richtlinien, Bestimmungen und Fachregeln zusammensetzen. Werden vom Architekten oder von den Fachplanern z. B. ungeeignete Baustoffe gewählt, Details fehlerhaft oder unzureichend ausgearbeitet, ist mit Schäden und einer verkürzten Lebensdauer der Bauteile zu rechnen. Des Weiteren ist im Rahmen der Planung auf mögliche physikalische oder chemische Vorgänge zu achten, die im Verlauf der Nutzungszeit auftreten können. Beispiele hierfür sind die Tauwasserbildung innerhalb eines Bauteils, Spannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten der beteiligten Baustoffe oder die Kontaktkorrosion unterschiedlicher Metalle. Bei fehlender Planung oder falscher Ausführung einer Konstruktion kann es zu erheblichen Schäden und zu einem vorzeitigen Ausfall von Bauteilen kommen. Ebenso kann sich eine Kombination von kurzlebigen und langlebigen Bauteilen in Abhängigkeit der Verbindungsmittel als nachteilig erweisen. Sind beide Teile fest miteinander verbunden und ist die Abnutzungsgrenze des kurzlebigen Bauteils erreicht, muss das langlebige Bauteil im ungünstigsten Fall mit ausgetauscht werden, ohne seine potenzielle Lebensdauer zu erreichen (siehe Kapitel 5.7). Im Idealfall werden bereits in der Planungsphase Instandhaltungsaspekte berücksichtigt, die die später notwendigen Instandhaltungs- oder Instandsetzungsmaßnahmen erleichtern bzw. ermöglichen.

6.2.3.2 Eingliederung in die Konstruktion

Die Unterteilung des Gebäudes in Bauteilelemente sowie die Zuordnung lebensdauerrelevanter Informationen (Orientierung, Umweltwirkungen, Innen- oder Außenbauteil, Mindestanforderungen, etc.) ist für die Prognose der Lebensdauern unbedingt erforderlich. Aufgrund der unterschiedlichen funktionalen Anforderungen sowie standort- und nutzerbedingter Einflüsse ist die genaue Kenntnis über die Lage des betrachteten Bauteils erforderlich, um geeignete Bauprodukte auszuwählen bzw. konstruktive Schutzmaßnahmen (Dachüberstand, Anstrich, etc.) planen zu können. Des Weiteren sollten künftige Veränderungsmöglichkeiten durch flexible und variable Gebäudestrukturen bereits in der Planungsphase Berücksichtigung finden, um die langfristige Funktionalität aufrecht zu erhalten.

6.2.3.3 Qualität des Planungsteams

Eine frühzeitige, qualitativ hochwertige und vollständige Planung hat großen Einfluss auf alle Bestandteile eines Gebäudes und deren Robustheit gegenüber möglichen Einflüssen.

Häufiges Einarbeiten nachträglicher Änderungen aufgrund nicht abgeschlossener oder nicht kommunizierter Planungen bei Baubeginn hat direkten Einfluss auf die Ausführungsqualität und kann somit die Lebensdauer bereits eingebauter Bauteile erheblich verkürzen.

6.2.3.4 Komplexität des Entwurfs

Schwierige Bauvorhaben, mit einer in organisatorischer, planungstechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht hohen Komplexität, erfordern ein leistungsfähiges Planungsteam. Schwächen im Entwurf oder im Bereich der Planungsbeteiligten können sich direkt auf die Lebensdauer von Bauteilen auswirken, weshalb die Gefahr von vorzeitigen Bauteilschäden oder gar kompletten Ausfällen bei einfachen Bauvorhaben deutlich geringer ist.

6.2.3.5 Qualitätssicherung in der Planung

Die Begleitung der Planungsphase bei komplexen Bauvorhaben durch unabhängige Dritte ist ein nicht zu vernachlässigender Aspekt. Durch ein gewerk- oder prozessorientiertes Qualitätsmanagement werden mögliche Fehlerquellen frühzeitig erkannt und vorhandene Mängel abgestellt. Eine rechtzeitige, mängelfreie Planungsleistung ist für die Erreichung der geplanten Bauteillebensdauern unbedingt erforderlich.

6.2.4 Ausführungsqualität (Faktor C)

6.2.4.1 Allgemeines

Ausführungsfehler können zu unplanmäßigen Beanspruchungen und somit zu vorzeitigem Funktionsverlust von Bauteilen führen. Handwerklich einwandfreie Arbeit kann aufgrund des heutzutage erhöhten Zeit- und Kostendrucks beim Bauen nicht mehr als selbstverständlich vorausgesetzt werden. Immer wieder wird bei der Ausführung gegen anerkannte Regeln der Technik verstoßen oder von den Bauplänen abgewichen, so dass es vor allem an sensiblen Bauteilen wie Fassade oder Dach häufig zu erheblichen Schäden kommen kann. Die Folgen sind ein erhöhter Aufwand bei der späteren Instandhaltung und eine geminderte technische Lebensdauer der Bauteile.

6.2.4.2 Qualität der Ausführung

Qualifikation und Erfahrung der ausführenden Firmen bzw. des eingesetzten Personals haben einen erheblichen Einfluss auf die Ausführungsqualität. Das Einhalten der anerkannten technischen Regeln ist Grundvoraussetzung für die Herstellung mängelfreier Bauteile und die Erreichbarkeit einer ausreichenden Qualität, wohingegen mangelnde Sachkenntnis oder geringe wirtschaftliche Leistungsfähigkeit des Bauausführenden zu deutlich verringerten Lebensdauern von Bauteilen führen können.

6.2.4.3 Qualität des Projektmanagements

Die Qualität eines Projektteams wird vor allem bei Änderungen während der Bauphase ersichtlich. Frühzeitiger Eingriff der Projektsteuerung und ausreichende Kommunikation lassen erst gar keine Probleme in den Schnittstellen der einzelnen Gewerke entstehen. Weiterhin ist das Projektmanagement für die Vorgabe von Qualitätsstandards verantwortlich, die vorab in Zusammenarbeit mit dem Bauherrn abgestimmt wurden. Schlechtes Projektmanagement führt zu Problemen zwischen den ausführenden Gewerken und zur lückenhaften Weitergabe von Informationen, so dass es zu Qualitäts- und Funktionseinbußen der Bauelemente kommt.

6.2.4.4 Klimatische Verhältnisse auf der Baustelle

Die Jahreszeit kann hinsichtlich der Ausführungsqualität eines Gebäudes eine wichtige Rolle spielen. Wird ein Gebäude im Winter erstellt, können niedrige Temperaturen beim Einbau die Qualität vieler Materialien (z. B. Beton, Mörtel, etc.) beeinträchtigen. Auch Wind oder direkte Sonneneinstrahlung können durch schnelleres Austrocknen zu Schäden führen. Werden Materialien oder Baustoffe trotz ungünstiger Bedingungen verarbeitet oder eingebaut, mindert sich deren Qualität, was zu einer Verkürzung der Lebensdauer oder einem erhöhten Aufwand der Instandhaltung führen kann.

6.2.4.5 Komplexität der Ausführung

Mängel in der Ausführung oder Unachtsamkeiten bei Transport und Lagerung können sich direkt auf die Lebensdauer von Bauteilen auswirken. Einfache Gebäude mit überwiegend Standardbauteilen sind deshalb weniger von vorzeitigen Bauteilschäden oder gar kompletten Ausfällen einzelner Bauteile bedroht, als hochkomplexe Sonderbauten.

6.2.4.6 Qualitätssicherung in der Ausführungsphase

Durch ein gewerkorientiertes Qualitätsmanagement während der Ausführungsphase werden mögliche Fehlerquellen frühzeitig erkannt und vorhandene Mängel abgestellt. Die mängelfreie Ausführung eines Bauvorhabens sowie die Einhaltung der vorgesehenen Qualitätsstandards sind für die Erreichung der geplanten Bauteillebensdauern unbedingt erforderlich.

6.2.5 Innenräumliche Umgebungsbedingungen (Faktor D)

6.2.5.1 Allgemeines

Die innenräumlichen Einflussfaktoren können zunächst in physikalische, chemische und biologische Faktoren unterschieden werden, die im Allgemeinen zu einer frühzeitigen Alterung führen. Unter den physikalischen Parametern versteht man die Faktoren, die

beim Menschen einen Einfluss auf die Behaglichkeit haben. Dazu gehören z. B. die Luftfeuchtigkeit oder die Temperatur. Die chemischen Faktoren sind sehr vielfältig und haben viele Ursachen und Quellen. Von Bedeutung sind alle Faktoren, die infolge von Emissionen Schadstoffkonzentrationen verursachen, die direkte Auswirkungen auf die Lebensdauer der betroffenen Bauteile haben. Als biologische und mikrobiologische Faktoren sind hauptsächlich Bakterien, Pilze und tierische Schädlinge zu nennen.

6.2.5.2 Raumlufthbedingungen

Obwohl die in der Luft enthaltene Wassermenge mit 0,1 - 3 Gewichtsprozent nur gering ist, beeinflusst die Luftfeuchtigkeit unser Wohlbefinden entscheidend: Bei sehr trockenem und warmem Klima (z. B. Wüstenklima, Heizungsluft) verliert der Mensch sehr viel Wasser und die Schleimhäute trocknen aus. In Innenräumen fühlt sich der Mensch normalerweise im Bereich von 35 - 65% relativer Luftfeuchtigkeit am wohlsten. Der Ausdruck „relative Luftfeuchtigkeit“ bezeichnet dabei das Verhältnis des Wasserdampfpartialdrucks zum Sättigungsdampfdruck. Auch für Bauelemente ist die relative Luftfeuchtigkeit ein entscheidender Faktor. Das „Arbeiten“ von Holz, also das Schwinden und Quellen, wird beispielsweise weitestgehend von der relativen Luftfeuchtigkeit bestimmt. Auch die Frage, ob Stahl rostet oder nicht, hängt von der relativen Luftfeuchtigkeit ab. Die jeweilige Umgebungstemperatur bestimmt dann lediglich, wie schnell die Korrosion voranschreitet. Über Simulationsverfahren kann die Luftfeuchtigkeit in Innenräumen relativ gut vorhergesagt werden, um somit eine Aussage über kondensatgefährdete Konstruktionen schon im Planungsstadium treffen zu können. Nähere Angaben zur Wasseraufnahme von Bauteilen sind im Abschnitt 6.2.6.5 „Feuchtigkeit“ der außenräumlichen Umweltbedingungen zu finden.

6.2.5.3 Temperatureinwirkung

Die Beanspruchung von Bauteilen durch Temperatureinwirkungen im Innenraum ist im Vergleich zu außenräumlicher Temperaturbelastung eher gering. Extremtemperaturen in „normalen“ Innenräumen sind selten und Temperaturschwankungen werden häufig durch die Außenhülle gedämpft, so dass es nur zu geringen Temperaturunterschieden kommen kann. Temperaturänderungen bewirken Längen- und Volumenänderungen von Bauteilen, die zu Spannungen und schlimmstenfalls zu Rissen führen können. Die Gefahr temperaturbedingter Schäden an Innenbauteilen wird eher gering eingeschätzt und ist häufig nur bei vollkommen unbeheizten bzw. nicht gedämmten Räumen mit ein oder mehreren Außenwänden problematisch.

6.2.5.4 Chemische Angriffe

Chemische Angriffe in Innenräumen sind nur in wenigen Ausnahmefällen nutzungsbedingt (z. B. Labore oder Kliniken). Die dort eingesetzten Bauteile sind üblicherweise für

diese Belastungen ausgelegt, so dass durch entsprechende Beschichtungen einer vorzeitigen Alterung der betroffenen Oberflächen vorgebeugt werden kann. Deutlich häufiger entstehen chemische Angriffe durch aggressive Reinigungsmittel (Säuren, Laugen, Lösungsmittel), die zu erheblichen Schäden an entsprechenden Bauteilen führen können.

6.2.5.5 Biologische Angriffe

Biologische Angriffe können in physikalischer oder chemischer Hinsicht schädlich auf ein Bauteil einwirken. In Innenbereichen ist vor allem der Befall durch Pilze und Mikroorganismen ein häufiges Problem, dass durch falsches Nutzerverhalten oder mögliche konstruktive Mängel verursacht wird. Das Auftreten von tierischen Schädlingen ist eher selten anzutreffen, kann aber zu erhebliche Schädigungen bis hin zur vollständigen Zerstörung des Bauteils führen.

6.2.6 Außenräumliche Umgebungsbedingungen (Faktor E)

6.2.6.1 Allgemeines

Der Einflussfaktor Außenräumliche Umgebungsbedingungen umfasst u. a. die Einflussgrößen Temperatur, Sonneneinstrahlung, Wind, Feuchtigkeit und Luftverschmutzung. Umwelteinflüsse im Allgemeinen können zu Rissen im Bauteil, Festigkeitsverlusten, Verrottung, etc. und damit zu einer Verkürzung der Lebensdauer führen. Zur Beurteilung der außenräumlichen Beanspruchungen existieren größtenteils Kartierungen mit Angaben zu Windlasten, Regenbeanspruchungen, Strahlungsintensität oder Schadstoffbelastungen, so dass über sogenannte Beanspruchungs- oder Risikogruppen die einzelnen Umwelteinflüsse nach jeweiligem Standort eingeteilt und grob bewertet werden können. Einzelne Karten, die nicht direkt über die Webseiten des Umweltbundesamts oder des Deutschen Wetterdienstes zu finden sind, wurden zusammen mit Auszügen aus den Lastnormen der DIN 1055 in Abschnitt F des Anhangs eingefügt.

6.2.6.2 Standortbedingungen

Zu den Standortbedingungen gehören neben den im Folgenden beschriebenen Klimafaktoren vor allem die Luftverschmutzung und der u. a. daraus entstehende chemische Angriff. Die wichtigsten Auslöser der Luftverschmutzung sind Energieerzeugung, Produktionsprozesse und Verkehr. Die Luftverschmutzung in Ballungsräumen ist deutlich größer als in ländlichen Gebieten. Immissionen können gas-, staub- oder russförmig oder als im Regen gelöste Flüssigkeit auf Bauwerke einwirken. Sie können den normalen Alterungsprozess, insbesondere von exponierten Bauteilen, die den Luftverschmutzungen besonders stark ausgesetzt sind, beschleunigen. Als wichtigste Schadstoffe zu nennen sind Schwefeldioxid (SO_2), als Auslöser von Abplatzungen in mineralischen Baustoffen, Koh-

lendioxid (CO_2), mit seiner verstärkenden Wirkung der Verwitterungsprozesse, und Stickstoffoxide (NO_x), die vor allem zur Versauerung und damit zur Materialschädigung beitragen. Weiterhin können Säuren und Laugen als Reaktionsprodukte zwischen Luftschadstoffen und Niederschlag oder durch Kontakt mit sulfathaltigen natürlichen Wässern und Böden auf Bauwerke einwirken. Eine Schädigung durch Salze ist vor allem in Küstennähe und im Spritzbereich von Verkehrsflächen zu erwarten. Zur Beurteilung der Beanspruchung existieren vom Umweltbundesamt veröffentlichte Kartierungen mit aktuellen Angaben zu den entsprechenden Schadstoffbelastungen.

6.2.6.3 Temperatureinwirkungen

Wie bereits bei den innenräumlichen Faktoren angedeutet, können Temperatureinwirkungen erhebliche Auswirkungen auf die Lebensdauer von Bauteilen haben. Kritisch sind in diesem Zusammenhang Extremtemperaturen und Temperaturschwankungen, die entweder täglich oder auch bedingt durch die jahreszeitlichen Klimaänderungen auftreten können. Temperaturänderungen an Bauteilen führen durch Längen- und Volumenänderungen zu internen Spannungen oder Rissen. Besonders zusammengesetzte Bauteile aus verschiedenen Baumaterialien sind betroffen. Zur Vermeidung von Rissen sind angemessene Bewegungsmöglichkeiten (z. B. durch Dehnfugen) erforderlich. Große Hitze und insbesondere große Temperaturdifferenzen innerhalb eines Bauteils sind häufige Auslöser spannungsbedingter Schäden. Im Gegensatz dazu können die rund 9% Volumenvergrößerung beim Übergang des flüssigen Wassers zu Eis bei dessen Behinderung zu Frostsprengungen führen. Zusätzlich beeinflussen die Gefrierpunktniedrigung des Wassers in kleinen Poren, die Verdunstungsneigung des Wassers an Porenoberflächen sowie die Diffusionsvorgänge von Wasser im Porensystem den Frostwiderstand von porösen Baustoffen.

6.2.6.4 Sonneneinstrahlung

Die Sonnenenergie, die an der Erdoberfläche ankommt, ist in verschiedenen Wellenbändern gebündelt. Ein Großteil der Energie wird von der Erdatmosphäre absorbiert bzw. reflektiert. Wie groß dieser Anteil letztlich ist, hängt von dem jeweiligen Wellenband und den Wetterbedingungen ab:

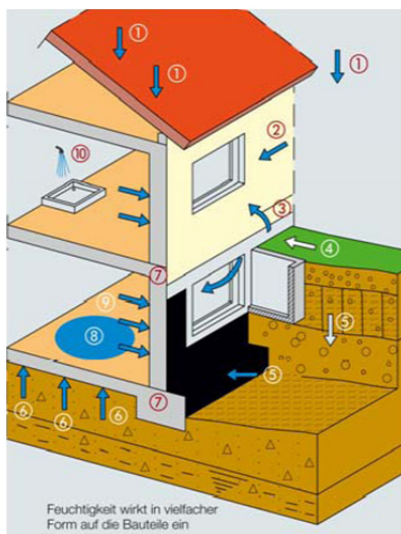
- Infrarotstrahlung: (Spektralbereich ca. 700 nm bis über 1000 nm)
Infrarotstrahlen werden von nahezu allen Materialien fast vollständig absorbiert, führen allerdings zu einer deutlichen Erhöhung der Oberflächentemperatur des betroffenen Bauteils. Farbe, Material und Struktur der Oberfläche sind wichtige Einflussgrößen auf den Betrag der absorbierten Strahlung und somit auf die Höhe der Temperaturänderung. Für eine vorgegebene Oberflächen- und Materialstruktur beeinflusst die Farbe die Strahlungsabsorption maßgeb-

- lich. Eine angenommen perfekt schwarze Oberfläche hat eine Absorptionsqualität von 100%. Die weiteren Farben schließen sich in etwa mit folgenden Werten an: Durchschnittliches schwarz (80%), dunkelgrün oder dunkles grau (70%), hellgrün oder helles grau (40%) und durchschnittliches weiß (12–20%).
- Sichtbarer Wellenbereich: (Spektralbereich ca. 300 nm bis 700 nm)
Der sichtbare Wellenbereich ist als realer Wetterzustand ausschlaggebend für die Strahlungsintensität. Während bei klarem blauem Himmel bis zu 1000 W/m² auf der Erdoberfläche ankommen geht die Intensität an bewölkten Tagen fast gegen 0 W/m². Weitere Einflussfaktoren auf die aktuelle Strahlungsstärke sind die Jahreszeit, die Tageszeit und die lokale Topographie.
 - Ultraviolette Strahlung: (Spektralbereich ca. 290 nm bis 400 nm)
Die im Sonnenlicht enthaltene ultraviolette Strahlung bewirkt bei vielen organischen Baumaterialien eine starke Beanspruchung der ihr ausgesetzten Bauteile. Obwohl die auf die Erdoberfläche auftreffende UV-Strahlung lediglich 1-7% der Gesamtstrahlung ausmacht, kann sie zu einem Aufspalten der chemischen Bindungen führen. Dies kann u. a. Versprödung und Festigkeitsverluste zur Folge haben. Die kurzwellige Strahlung kann insbesondere organische Baustoffe vonseiten der Oberfläche zerstören. Gefährdete Bauteile sind bituminöse Dachbahnen und Folien, aber auch Oberflächenbeschichtungen aus Harzen und Kunstharzen. Auch für die Alterung von Holz durch den Abbau des Lignins und der damit verbundenen Vergrauung ist die UV-Strahlung von Bedeutung.

Anhand von Strahlungskarten des Deutschen Wetterdienstes sowie durchschnittlicher Sonnenscheindauern (z. B. Anhang F.3) kann die Intensität der Sonneneinstrahlung grob abgeschätzt werden. Farbe und Ausrichtung des Bauteils sind ebenfalls bei der Beurteilung zu berücksichtigen.

6.2.6.5 Feuchtigkeit

Feuchtigkeit ist ein wichtiger Einflussfaktor hinsichtlich der Lebensdauer von Bauteilen. Sie kann in flüssigem und in gasförmigem Aggregatzustand in Baustoffe eindringen und somit sowohl von außen, beispielsweise in Form von Niederschlag, Grundwasser oder Luftfeuchtigkeit, als auch von innen, beispielsweise in Form von Wasserdampf, Kondens- bzw. Tauwasser oder Baufeuchte auf die Bauteile einwirken. Ein Überblick über die Beanspruchungsmöglichkeiten durch Feuchtigkeit an Bauteilen ist in Abbildung 6-1 gegeben.



- | | |
|----|--------------------------------------|
| 1 | Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel) |
| 2 | Schlagregen |
| 3 | Spritzwasser |
| 4 | Oberflächenwasser |
| 5 | Schichtenwasser, Stauwasser |
| 6 | Bodenfeuchte |
| 7 | Kapillarwasser, Tauwasser im Bauteil |
| 8 | Porenwasser, Überschwemmung |
| 9 | Raumklima und relative Feuchte |
| 10 | Wasserdampf (kalt + heiß) |

Abbildung 6-1: Beanspruchung von Bauteilen durch Feuchtigkeit aus Wienerberger (2008)

Kabrede & Spirgatis (2003) beschreiben in ihrer Arbeit folgende Möglichkeiten der Wasseraufnahme in Baustoffen, die aus den in Abbildung 6-1 gezeigten Beanspruchungen entstehen:

- Wasseraufnahme und Wassertransport durch kapillare Saugfähigkeit
- Wasseraufnahme durch Druck-, Stau- und Sickerwasser
- Wasseraufnahme durch Schlagregen
- Wasseraufnahme durch Kondensation
- Wasseraufnahme durch Kapillarkondensation
- Hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme
- Osmose

Im Zusammenwirken mit weiteren Einflussfaktoren ist Feuchtigkeit häufig der maßgebende Auslöser von Schäden, z. B. bei niedrigen Temperaturen durch Frost, bei der Ausbreitung biologischer Schädlinge oder als mechanische Beanspruchung bei Hagel oder drückendem Wasser. Das Verhalten eines Bauteils gegenüber Feuchtigkeit ist von den spezifischen Eigenschaften der verwendeten Materialien abhängig. So begünstigt Feuchtigkeit u. a. das Auslaugen von Mörtel und Beton, das Verrotten von Holz, das Verwittern von Stein sowie das Oxidieren von Stahlbauteilen. Des Weiteren kann sie zu Putz- und Lackablösungen führen. Feuchtigkeit tritt häufig in Form von Niederschlag auf. Zur Beurteilung der Beanspruchung existieren Kartierungen mit sogenannten Beanspruchungs- oder Risikogruppen.

6.2.6.6 Biologische Angriffe

Wie bereits bei den innenräumlichen Umweltfaktoren beschrieben, können biologische Angriffe sowohl in physikalischer als auch in chemischer Hinsicht schädlich auf ein Bauteil einwirken. Pflanzenbewuchs, Moose und Algen können negative Wirkungen an porö-

sen Baustoffen durch Sprengwirkungen in Fugen, Frostschäden durch erhöhtes Zurückhalten von Wasser oder durch Bildung von Huminsäuren verursachen. Des Weiteren können Schäden durch Pilzbefall, Ansiedlung von Insekten oder Mikroorganismen entstehen. Selbst der jährliche Laubbefall kann zur Verstopfung der Dachabläufe und somit zu weitreichenden Schäden an der Abdichtung führen.

Folgende Abbildung 6-2 zeigt die erforderlichen Zusammenhänge für das Auftreten von biologischen Schädigungen:

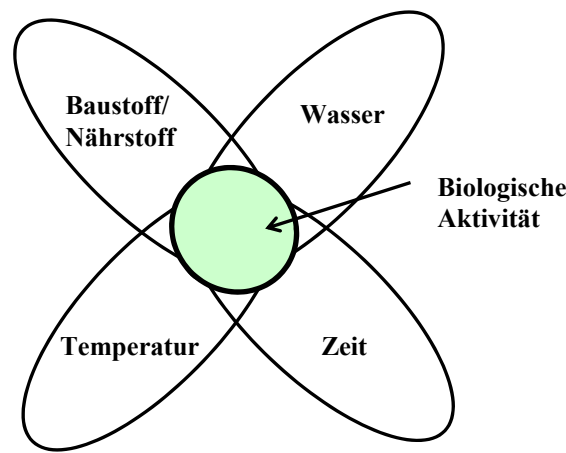


Abbildung 6-2: Abhängigkeiten eines möglichen biologischen Angriffs

6.2.6.7 Erschütterungen

Bauwerksererschütterungen können zu erheblichen Schäden an Bauteilen führen und dadurch deren Lebensdauer beeinflussen. Abhängig von der Belastungsstärke (Intensität, Frequenz, Erschütterungsart) reicht das Schadensbild von Risschäden in der Gebäudesubstanz bis hin zu Tragfähigkeitsverlusten in der Gebäudestruktur.

Für die Erschütterung von Gebäuden gibt es zahlreiche, sehr unterschiedliche Ursachen. Neben den natürlichen Ursachen, wie z. B. Erdbeben (Anhang F.7), ist ein Gebäude häufig extremen Belastungen z. B. durch Bahn- oder Flugverkehr, Schwerlast- und Straßenverkehr ausgesetzt. Auch Baustellen in Bauwerksnähe können, aufgrund der zum Einsatz kommenden Maschinen und Geräte bei Abbrucharbeiten, Sprengungen oder Tunnelvortrieb, zu starken Erschütterungen und somit zu Schäden am Gebäude führen. Darüber hinaus können auch infolge ungleichmäßiger und ungleichförmiger Setzungen Schäden am Gebäude auftreten. Diese können beispielsweise durch Bergbauarbeiten, durch Grundwasserabsenkungen oder aufgrund geologischer Ursachen ausgelöst werden.

6.2.6.8 Wind

Einwirkungen durch Windlast beschleunigen den Alterungsprozess beanspruchter Bauteile. Aus Windeinwirkung entstehen u. a. Druck- und Sogkräfte, die auf die Außenflächen einwirken und dadurch Schwingungen hervorrufen können. Sie wirken jedoch nicht nur direkt auf die Außenfläche geschlossener Gebäude, sondern auch indirekt über Öffnungen auf innenliegende Wände. Darüber hinaus kann neben den durch Wind verfrachteten Luftschadstoffen, die in Form von atmosphärischen Niederschlägen in die Umwelt eingetragen werden, beispielsweise auch durch Wind transportierter Sand zu so genannten Abrasionsschäden an exponierten Bauelementen führen und dadurch die Lebensdauer der entsprechenden Elemente verkürzen. Bei Flachdächern kann eine beschleunigte Alterung der bituminösen Abdichtung durch eine lokale Windverfrachtung der Kiesschicht stattfinden, wodurch Teile der Abdichtung freigelegt werden und diese ungeschützt der Witterung ausgesetzt ist. Die Windlast ist sowohl zeitlichen als auch räumlichen Schwankungen unterworfen. Zur Beurteilung der Beanspruchung existieren Kartierungen mit Angaben zu den entsprechenden Windlasten (Anhang F.8).

6.2.7 Nutzungsintensität (Faktor F)

6.2.7.1 Allgemeines

Das Verhalten der Nutzer ist bei vielen Bauteilen die Einflussgröße mit den größtmöglichen Auswirkungen. Gebäude werden im wahrsten Sinne des Wortes abgenutzt. Dies betrifft besonders die Bauteile des Ausbaus, z. B. Böden, Türen und Fenster sowie alle beweglichen Teile der technischen Anlagen, z. B. Bedienelemente. Die Abnutzung der Bauteile hängt nicht nur von deren Eigenschaften, sondern auch in besonderem Maße vom Verhalten der Nutzer ab. Im günstigsten Fall pflegt der Nutzer das Gebäude mit der erforderlichen Sorgfalt selbst. Im ungünstigsten Fall werden Teile des Gebäudes in kürzester Zeit durch Vandalismus und falsche Nutzung zerstört. Ausschlaggebend für das Verhalten der Nutzer ist vor allem der Grad der Identifikation mit dem Gebäude. Eine geringe Nutzerakzeptanz führt zu einer schnelleren Abnutzung bestimmter Bauteile. Sie zeigt sich beispielsweise vermehrt in Gemeinschaftsbereichen anonymer Wohnanlagen wie z. B. in Eingangsbereichen, Treppenhäusern oder Aufzügen.

Hauptursache für vorzeitigen Verschleiß ist aber häufig eine unvorhergesehene Nutzung des Bauteils, sei es durch erhöhten Reinigungsaufwand, starken Publikumsverkehr oder sonstige Überbeanspruchung. Für diese Arbeit sind jedoch nur planmäßige Einwirkungen relevant, weshalb außerplanmäßige Einwirkungen sowie mutwillige Gewalteinwirkung bei der Modellbildung nicht berücksichtigt werden.

6.2.7.2 Art der Nutzung

Eine wichtige Rolle in der Lebensdauerbetrachtung kommt der Nutzung eines Gebäudes zu. Die Art der Gebäudenutzung bestimmt indirekt die Intensität der Nutzung, wie auch die Art und die Höhe von möglichen Belastungen. Bauteile intensiv genutzter Bauwerke, wie z. B. Schulen oder Krankenhäuser, unterliegen einem stärkeren Verschleiß als übliche Wohngebäude. Laut schweizerischem Hauseigentümerverband HEV (1994) haben insbesondere Boden-, Wand- und Deckenbeläge bei gewerblicher Nutzung eine um 20 bis 50% geringere Lebensdauer verglichen mit einer privaten Nutzung. IP Bau (1994) macht dagegen Angaben zur generellen Reduktion der Lebensdauer bei unterschiedlicher gewerblicher Nutzung (siehe Tabelle 6-2). Darüber hinaus ist der Alterungsprozess abhängig von der Anzahl der dort lebenden bzw. arbeitenden Personen, vom Umfang der zur Verfügung stehenden Flächen und von der täglichen Nutzungsdauer.

Tabelle 6-2: *Abhängigkeit der Lebensdauer von der Nutzungsart nach IP BAU (1994)*

Nutzungsart	Lebensdauer verglichen mit privater Nutzung
Büros	Reduktion um 20%
Gewerbe, Fabrikationen	Reduktion um 25%
Läden	Reduktion um 25%
Restaurants	Reduktion um 50%

Die Nutzungsart beeinflusst auch die Art und die Höhe von anderen lebensdauerbeeinflussenden Faktoren. In Industrie- oder Gewerbebauten können beispielsweise chemische, bauteilbelastende Substanzen zum Einsatz kommen, die für Bauteile im Wohnungsbau nicht beachtet werden müssen, während in einem Schwimmbad der Einfluss von Luftfeuchtigkeit eine größere Rolle spielt als in einem gewerblich genutzten Gebäude.

6.2.7.3 Mechanische Einflüsse

Mechanische Belastungen auf Bauteile haben zahlreiche verschiedene Ursachen und Folgen. Schon alleine durch das Begehen oder Befahren eines Fußbodens erfolgt eine Abnutzung, die durch einen in der Planung festgelegten Qualitätsstandard abgedeckt sein muss. Vor allem aber außerplanmäßige Einflüsse, wie der Anprall von Fahrzeugen oder anderen Gegenständen sind mechanische Beanspruchungen, die sich negativ auf die Lebensdauer von Bauteilen auswirken.

Darüber hinaus kann eine Erhöhung der Lasten am Gebäude beispielsweise durch Umbauten, Aufstockungen oder auch Nutzungsänderungen zu Bauwerksschäden führen. Auch Belastungen in Folge von Windeinwirkung, Schnee- oder Eislast zählen zu den mechanischen Belastungen.

6.2.7.4 Verschmutzungs- und Reinigungsintensität

Übermäßige Verschmutzung kann, je nach Schweregrad, erhebliche Auswirkungen auf die Lebensdauer von Bauteilen haben. Ursachen für die erhöhte Verschmutzung von z. B. Bodenbelägen können sein:

- Zugangsbereiche des Gebäudes nicht ausreichend befestigt
- Nicht ausreichend dimensionierte Sauberlaufzonen mit entsprechenden Schmutzfangmatten
- Unplanmäßige Nutzung des Gebäudes

Ebenso wie durch übermäßige Verschmutzung kann allerdings auch durch zu hohe Reinigungsintensität die Lebensdauer von Bauteilen verringert werden. Dazu gehören sowohl die Reinigungsfrequenz als auch die Reinigungsstärke (Gefahr des Abriebs), genauso wie den Oberflächen angepasste Reinigungsmittel.

6.2.7.5 Optischer Anspruch

Optische Ansprüche an bestimmte Bauteile oder Oberflächen sind streng genommen immaterielle Einflüsse, die individuell unterschiedlich bewertet werden können. Neben der Außenfassade sind häufig Innenbauteile betroffen, wobei insbesondere die Oberflächen hinsichtlich Farbe, Muster und Machart eine wichtige Rolle spielen. Zwar ist die Beurteilung, ob ein Bauteil noch zeitgemäß ist, oder nicht, individuell unterschiedlich, aber durch die Betrachtung von Farbbeständigkeit, Oberflächenstruktur oder auch Farbwirkung kann es als funktionale Anforderung im Bereich von öffentlichen Sichtflächen zu einer notwendigen Berücksichtigung im Rahmen der Lebensdauerermittlung führen.

6.2.7.6 Aktualisierte Gebäudeinformation

Das Vorliegen von aktuellen Informationen über den Betrieb und die Pflege einzelner Bauteile kann große Auswirkungen auf die Lebensdauer betroffener Bauteile (v. a. in der Haustechnik) haben. Üblicherweise wird dem Nutzer eines Gebäudes oder Gebäudeteils ein Nutzerhandbuch zur Verfügung gestellt, welches maßgebende Hinweise zur Pflege und zur Verwendung entsprechender Bauteile liefert. Nicht aktualisierte oder nicht vorhandene Anleitungen führen möglicherweise zu falscher Pflege oder übermäßiger Nutzung, die wiederum negative Auswirkungen auf die Lebensdauer haben können.

6.2.8 Instandhaltungsniveau (Faktor G)

6.2.8.1 Allgemeines

Eine sorgfältig geplante und regelmäßig durchgeführte Instandhaltung kann einen erheblichen Beitrag zur Verlängerung der Lebensdauer von Bauteilen leisten. In Abhängigkeit

der gewählten Instandhaltungsstrategie werden Maßnahmen entweder erst dann ergriffen, wenn ein Schaden oder ein Ausfall vorliegt (Ausfallorientierte Instandhaltung), oder es werden Maßnahmen in regelmäßigen Zeitabständen vorgenommen, unabhängig davon, ob der Zustand des Bauteils diese erfordert (Zeitorientierte Instandhaltung), oder es wird ein Austausch durchgeführt, wenn eine vorher festgelegte Grenze des Abnutzungsvorrats unterschritten wird (Zustandsorientierte Instandhaltung). Jede Strategie (siehe auch Kapitel 3.5) hat ihre eigenen Vor- und Nachteile, so dass im Einzelfall über die Art und Weise der Instandhaltung entschieden werden muss.

6.2.8.2 Instandhaltungszyklus

Die Häufigkeit und Regelmäßigkeit von Inspektions- und Wartungsmaßnahmen ist vor allem bei der zeitorientierten Instandhaltungsstrategie ein maßgebender Faktor auf die Lebensdauer von Bauteilen. Während eine zu seltene oder zu späte Instandhaltung direkt zu Schäden an Bauteilen und damit zum Ende der Lebensdauer führen kann, ist eine angemessene, regelmäßige Begutachtung des Bauteilzustands (evtl. mit kleineren Wartungsmaßnahmen) durchaus in der Lage, die Lebensdauer eines Bauteils zum Teil erheblich zu verlängern. Aus Kostengründen werden Instandhaltungszyklen häufig zu lang angesetzt oder gar keine Instandhaltung durchgeführt, so dass nur in Ausnahmefällen mit einer Verlängerung der Lebensdauer zu rechnen ist.

6.2.8.3 Instandhaltungsqualität

Die Qualität der Instandhaltung spielt in Bezug auf die Lebensdauer von Bauteilen eine besonders wichtige Rolle. Diese zeigt sich nicht nur, wie bereits beschrieben, in der Intensität, sondern vor allem in der Art ihrer Ausführung, wie zum Beispiel durch die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben, Richtlinien oder Herstellerempfehlungen. Werden empfohlene Inspektions- und Wartungsintervalle nicht eingehalten oder Instandhaltungsmaßnahmen nicht sachgemäß durchgeführt, ist eine vorzeitige Abnutzung zu erwarten. Die nachfolgende Abbildung 6-3 zeigt beispielhaft für die Bauteile Sanitärinstallation, Fenster und Flachdach wie sich die Lebensdauer in Abhängigkeit von der Instandhaltungsqualität verändert.

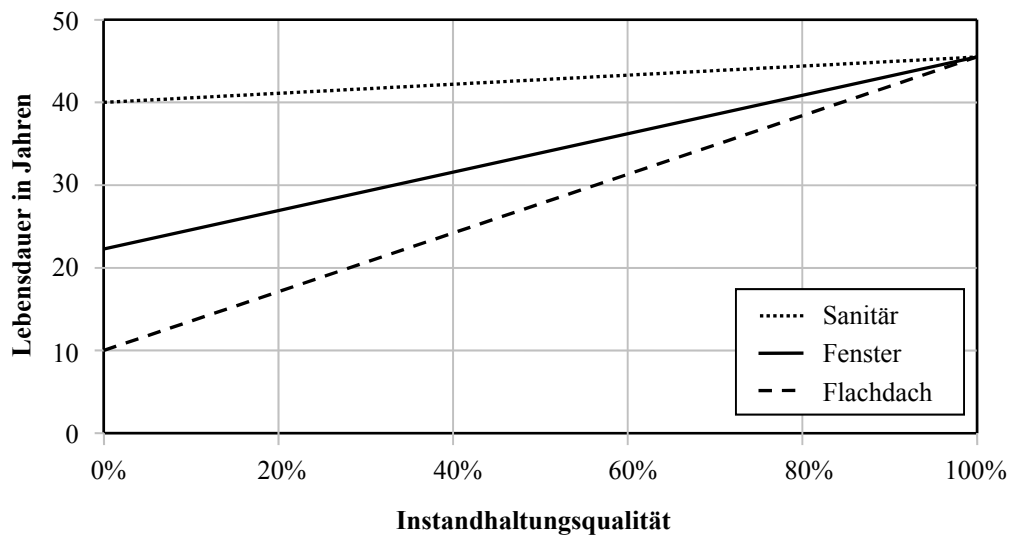


Abbildung 6-3: Vereinfachte Darstellung der Lebensdauer von Bauteilen in Abhängigkeit von der Instandhaltungsqualität

Es wird deutlich, welche Bedeutung die Instandhaltung hinsichtlich der Lebensdauer von Bauteilen hat. Bezüglich der Reduktion der Lebensdauer verschiedener Bauelemente bei unterlassener Instandhaltung sind Anhaltswerte in der nachfolgenden Tabelle 6-3 aus Christen & Meyer-Meierling (1999) zu finden.

Tabelle 6-3: Reduktion der Lebensdauer bei 0% Instandhaltungsqualität aus Christen & Meyer-Meierling (1999)

Bauteilgruppe	Ausführungsvariante	Reduktion der Lebensdauer
Rohbau massiv		0 – 10%
Rohbau übriges		10%
Dachhaut	Steildach	70%
	Flachdach	80%
Fassaden	konv. verputzt	10%
	Kompaktfassade	30%
	Holz	50%
Fenster, Läden	in Holz	50%
	in Metall/Kunststoff	10%
Elektro		0%
Heizung		0%
übrige Haustechnik		20%
Sanitär		10%
Innenausbau		0%

Einen Hinweis bezüglich der Instandhaltungsqualität können zum Beispiel abgeschlossene Wartungsverträge geben, bei denen die Qualitätshöhe vertraglich vereinbart ist. Ob die Ausführungsqualität der im Wartungsvertrag vereinbarten Leistungen tatsächlich entspricht, zeigt sich jedoch erst im Ergebnis. Darüber hinaus hängt die Qualität auch in ho-

hem Maß von der Qualifikation des Instandhaltungspersonals sowie vom Einsatz geeigneter Geräte, Werkzeuge und Pflegemittel ab.

6.2.8.4 Aktualisierte Gebäudedokumentation

Die systematische Dokumentation eines Gebäudes ist als wichtiges Hilfsmittel für den gesamten Lebenszyklus einer Immobilie anzusehen. Als wesentliche Inhalte sollten nach BBSR Info-Blatt 9.1 (2006) u. a. enthalten sein:

- Allgemeine Angaben zum Gebäude (Gebäudeart, Standort, Baujahr, Geschosszahl, Gebäudevolumen, Wohn- und Nutzflächen in m²)
- Planungsunterlagen (Bauvorlagen, Bestandsunterlagen, Pläne, Statik, Baubeschreibung, techn. Gebäudeausrüstung, Ver- und Entsorgung)
- Bautagebuch
- Energieeffizienznachweis
- Nutzungskosten und Verbräuche
- Unterlagen über Wartungs-, Modernisierungs- oder Umbaumaßnahmen
- Instandhaltungsplan

Eine umfassende Gebäudedokumentation ist ein gutes Instrument, wertmindernden Instandhaltungsrückstand zu vermeiden und somit die unter den gegebenen Randbedingungen maximalen Lebensdauern zu erreichen. Es empfiehlt sich, die Gliederung der Gebäudedokumentation systematisch und allgemeinverständlich aufzubauen, so dass auch einblicknehmende Dritte, wie z. B. der betreuende Architekt oder eventuelle Kaufinteressenten schnell und gezielt die relevanten Informationen entnehmen können. Neben der systematischen Gliederung ist auf die Vollständigkeit der Unterlagen in den einzelnen Kategorien zu achten; fehlende Nachweise sollten beigebracht oder erstellt und veraltete aktualisiert oder ergänzt werden. Die Erstellung und Aktualisierung von Bestandsunterlagen wird u. a. durch den betreuenden Architekten oder durch die jeweiligen Fachplaner ausgeführt.

6.2.8.5 Instandhaltungsfreundlichkeit

Die Instandhaltungsfreundlichkeit von Bauteilen kann die Instandhaltungsqualität beeinflussen und damit auch deren Lebensdauer. Ein instandhaltungsfreundliches Bauteil erleichtert die Instandhaltung, was in der Regel mit einer verbesserten Instandhaltungsqualität einhergeht. Parameter für die Instandhaltungsfreundlichkeit können u. a. sein:

- Zugänglichkeit zu den instandzuhaltenden Bauteilen, Prüfpunkten oder Schmierstellen
- Prüfbarkeit einer Betrachtungseinheit zur Feststellung des IST-Zustandes
- Überwachbarkeit durch in Anlagen installierte Überwachungseinrichtungen zur Abgabe von Warnsignalen

- Lösbarkeit und Austauschbarkeit von Komponenten, Geräten und Bauteilen (siehe auch Kapitel 5.7)
- die Standardisierung von Komponenten, Geräten, Bauteilen, Befestigungs- und Verbindungsmitteln
- ggf. leichte Justierbarkeit und Kalibrierbarkeit
- die Wahl instandsetzungsfreundlicher oder instandsetzungsfreier Geräte oder Bauteile

6.3 Immaterielle Einflüsse

6.3.1 Allgemeines

Die Verweildauer eines Bauteils im Gebäude ist nicht zwangsläufig nur von der technischen Lebensdauer abhängig. So können zum Beispiel modische Aspekte, technischer Fortschritt oder auch normative Änderungen dazu führen, dass ein voll funktionstüchtiges Bauteil ausgetauscht wird und die technisch mögliche Lebensdauer nicht voll ausgenutzt wird. Die sogenannte immaterielle Alterung ist nicht im Bauteil selbst begründet und kann daher auch nicht beeinflusst werden, so dass die Vorhersage der tatsächlichen Verweildauer von Bauteilen in bzw. an einem Gebäude nicht möglich ist.

6.3.2 Funktionale Überalterung

Die technische Lebensdauer eines Bauteils kann häufig durch neue Anforderungen an die Funktionalität oder die Gestaltungsqualität eines Gebäudes nicht erreicht werden. Auslöser sind fast immer Nutzungsänderungen, die eine Neueinteilung von Wohn- oder Büroflächen erfordern oder Änderungen, die durch Komplementärprodukte erzwungen werden.

6.3.3 Modische Obsoleszenz

Die modische Überalterung bezieht sich auf Änderungen hinsichtlich modischer bzw. formaler Ansprüche, wodurch funktionstüchtige Bauteile aus ästhetischen Gründen vor dem Erreichen ihrer technischen Lebensdauer ersetzt werden. Die Beurteilung, ob ein Bauteil noch zeitgemäß ist, oder nicht, ist individuell sehr unterschiedlich, so dass eine Berücksichtigung der modischen Obsoleszenz bei der Lebensdauerprognose nicht möglich ist. Trotzdem kann es durch die Betrachtung von Farbbeständigkeit, Oberflächenstruktur oder auch Farbwirkung als funktionale Anforderung im Bereich von öffentlichen Sichtflächen zu einer notwendigen Berücksichtigung im Rahmen der Lebensdauerermittlung führen.

6.3.4 Baurechtliche Obsoleszenz

Änderungen und Anpassungen von Normen und Richtlinien können zum Austausch funktionstüchtiger Bauteile führen, wenn sie in ihrem Aufbau oder ihrer Funktion nicht mehr den Ansprüchen der neu festgelegten baurechtlichen Auflagen gerecht werden können.

6.3.5 Ökologische Überalterung

Ökologische Aspekte rücken im Bauwesen zunehmend in den Mittelpunkt des öffentlichen Interesses. Die Anforderungen an ein Gebäude bezüglich Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit haben in den letzten Jahren im Zuge eines verstärkten Nachhaltigkeitsbewusstseins deutlich zugenommen. Entspricht ein Bauteil bezüglich der ökologischen Kriterien nicht mehr dem Stand der Technik, kann es zur Förderung des Umweltschutzes, trotz bestehender Funktionstüchtigkeit und einer gewissen Restlebensdauer, ausgetauscht werden.

6.3.6 Ökonomische Obsoleszenz

Auch ökonomische Aspekte sind hinsichtlich der Bauteillebensdauer von Bedeutung. Nicht selten werden Bauteile oder Bauteilschichten ersetzt, weil ihr Einsatz nicht mehr wirtschaftlich ist. Als bestes Beispiel kann hier die Wärmedämmung genannt werden, die aufgrund gestiegener Energiekosten erneuert wird. Weiterhin führen hohe Instandhaltungskosten häufig zum Ersatz eines technischen Bauteils, das grundsätzlich noch funktionsfähig ist.

6.3.7 Technische Überalterung

Die technische Weiterentwicklung verläuft immer schneller. Bauteile, deren Funktion häufig noch keinerlei Mängel aufweist, entsprechen häufig nicht mehr den aktuellen technischen Standards. Die Ansprüche der Nutzer steigen mit den technischen Entwicklungen, so dass die Bauteile unabhängig von ihrem Restpotential ausgetauscht und durch modernere Bauteile ersetzt werden. Auch das Fehlen von passenden Ersatzteilen zur Instandhaltung eines Bauteils, kann zu einem Austausch des gesamten Bauteils führen.

6.3.8 Sonstige immaterielle Einflüsse

In der Literatur lässt sich darüber hinaus eine Vielzahl weiterer Einflussfaktoren auf die immaterielle Abnutzung eines Bauteils finden. Nach Bahr (2010) und Schwaiger (2002) können dies u. a. sein:

- aktuelle Konjunkturdaten
- Änderungen im Steuer- oder Mietrecht

- staatliche Förderprogramme
- die Verlagerung eines Produktionsstandorts
- Bebauungsplanänderungen
- Planungsrechtliche Festsetzungen (Denkmalpflege)

6.4 Materialspezifische Einflüsse

6.4.1 Allgemeines

Jeder Werkstoff besitzt ein materialspezifisches Alterungsverhalten. Er reagiert individuell auf die unterschiedlichen Einflüsse, denen er ausgesetzt ist. Bei der Bewertung der Wirkungsweise von Einflussfaktoren ist das Wissen über die spezifischen Materialeigenschaften von großer Bedeutung. Im Folgenden werden die materialabhängigen Auswirkungen von Einflussfaktoren für die wichtigsten Materialien dargestellt.

Aufgrund des Umfangs und der Komplexität der Thematik können im Rahmen dieser Arbeit nur einige wenige Baustoffe näher betrachtet werden. Ausführliche Darstellungen der verschiedenen Materialgruppen sind z. B. in Rudolphi (2005) und CIB-Publication 295 (2004) zu finden.

6.4.2 Einflüsse auf bewehrten und unbewehrten Beton

An Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton werden hohe Anforderungen gestellt, die in verschiedenen Normen geregelt sind. Die DIN 1045-1 (2008) definiert Beton als künstlichen Stein, der sich aus einem Gemisch aus Zement, Zuschlagsstoffen, Zusatzmitteln und Wasser zusammensetzt. Die Normung hat als wesentliche Ziele die Sicherung der Standsicherheit und der Dauerhaftigkeit. Die Dauerhaftigkeit ist abhängig von den in der Nutzung zu erwartenden Einwirkungen. Die Normung unterscheidet dabei zwischen den Angriffsrisiken auf die Bewehrung und den Beton, und teilt sie in Expositionsklassen ein (siehe Tabelle 6-4). In der Untergliederung der einzelnen Klassen in Angriffsstufen werden die Umgebungsbedingungen weiter differenziert. Auf eine Darstellung dieser Klassen sowie auf eine nähere Betrachtung der Betonbauteile wird an dieser Stelle verzichtet, da die mittlere Lebensdauer von Betonbauteilen üblicherweise deutlich über der für diese Arbeit maßgebenden Lebensdauer von 50 Jahren liegt. Der Vollständigkeit halber werden die wesentlichen Schadensrisiken von Betonbauteilen dennoch kurz dargestellt.

Tabelle 6-4: Übersicht der Expositionsklassen nach DIN 1045-1 (2008)

Expositionsklasse	Angriffsrisiko
	für den Beton
X0	Kein Angriffsrisiko
XF Freezing	Frost mit / ohne Taumittleinwirkung
XA Chemical Attack	Chemische Angriffe
XM Mechanical Abrasion	Verschleiß
	für die Bewehrung
XC Carbonation	Karbonatisierung
XD De-icing-Salt	Chlorideinwirkung aus Streusalzen
XS Seawater	Chlorideinwirkung aus Meerwasser bzw. salzhaltiger Luft

Korrosion von Bewehrungsstählen und eine daraus folgende Volumenvergrößerung birgt das größte Gefährdungspotential für Stahlbetonbauteile. Während der Erhärtung des Zements stellt sich im Porenwasser des Zementsteins ein pH-Wert von ca. 12,6 ein, der eine Oxidation des Stahls verhindert. Diese passivierende Alkalität des Betons geht verloren, wenn sie z. B. durch Kohlendioxid (CO_2) neutralisiert wird. Die Geschwindigkeit und Eindringtiefe des durch Diffusion an den Zementstein gelangenden CO_2 wird von der Betongüte, der Zementart und dem Feuchtegehalt des Betons bestimmt. Erreicht die Karbonatisierung den Bewehrungsstahl, wird durch das Absenken des pH-Wertes auf ca. 9,5 und darunter eine Depassivierung der Stahloberflächen eingeleitet. Bei gleichzeitiger Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff beginnt der Stahl zu rosten. Eine weitere und unter Umständen verstärkende Ursache für die Korrosion der Bewehrungsstähle sind Chloride aus Meerwasser oder salzhaltiger Luft. Da der Karbonatisierungsprozess nach innen hin abnimmt, kann die Korrosion der Bewehrungsstähle mit einer ausreichenden Betonüberdeckung im Zeitraum der geplanten Nutzung verhindert werden.

Weitere Schadensrisiken aus mechanischem Verschleiß oder Frostbruch liegen in entsprechend befahrenen oder durchnässten Bauteilen vor. Bei ausreichender Bemessung und normgerechter Ausführung werden diese Risiken für den geplanten Nutzungszeitraum (50 Jahre nach DIN EN 206-1) ausgeschlossen.

6.4.3 Einflüsse auf mineralische Bindemittel in Mörtel, Putz und Estrich

Mörtel, Putze und Estriche werden aus Mischungen auf Basis der Bindemittel Kalk, Zement, Gips oder Magnesium mit unterschiedlichen mineralischen Zuschlägen hergestellt. Die sich auf die Lebensdauer auswirkenden Einflüsse sind mit den Schadensrisiken bei unbewehrtem Beton vergleichbar:

- Lastabtrag und Überlastung
- Fehler und Mängel in der Ausführung
- Ungeeignete Materialwahl

- Beschaffenheit des Untergrunds
- Verschleiß infolge mechanischer Belastung oder Umwelteinflüssen
- Ermüdung
- Feuchtigkeit
- Frostsprengung
- Salzsprengung
- Bindemittelauslaugung
- Unterschiedliches Schwindverhalten von Bauteilen
- Verformungen von Bauteilen führen zu Rissen
- Thermische Bewegungen in den Konstruktionen

Aus der Zusammenstellung der Schadensrisiken wird ersichtlich, dass v. a. der Eintrag von Feuchtigkeit und übermäßige mechanische Belastung zu einem vorzeitigen Ende der Lebensdauer von mineralischen Baustoffen führen kann.

6.4.4 Einflüsse auf keramische Werkstoffe

Zu den keramischen Werkstoffen im Bauwesen gehören u. a. Mauerziegel, Klinker, Fliesen und Dachziegel. Für die Herstellung von keramischen Produkten wird Ton, gemischt mit einer Reihe von Zuschlägen (v. a. Feldspat- und Quarzanteile), gebrannt. Zur Kennzeichnung der Eigenschaften wird der gebrannte Ton auch als Scherben bezeichnet. Die Eigenschaften von keramischen Bauteilen hängen stark von der Temperatur des Brennvorgangs ab. Produkte, die bis 1200°C gebrannt werden, sind relativ porös und können dadurch Feuchtigkeit aufnehmen, was zu Frostschäden führen kann. Ab einer Temperatur von 1200°C spricht man vom Sintern. Gesinterte Produkte sind dichter und können nur noch sehr wenig Wasser aufnehmen, weshalb z. B. gesinterte Klinker in Fassaden eingesetzt werden. Die Wasseraufnahmefähigkeit von Dachziegeln, Vormauerziegeln und Wandplatten kann durch eine Beschichtung (Glasure) verringert werden. Sie besteht aus einer eingefärbten Tonschlämme, die beim Brennen eine dichte Oberfläche ausbildet. Die keramischen Werkstoffe werden aufgrund ihrer Zusammensetzung nach den Bereichen Grob-, Fein- und Sonderkeramik unterschieden (siehe Abbildung 6-4). Konstruktiv wird im Baubereich vor allem Grobkeramik eingesetzt. Die Ziegeleierzeugnisse wie Mauerziegel oder Dachziegel gehören auch bei einer glasierten Oberfläche zu den porösen Scherben. Dagegen gehören Klinker, Riemchen oder Spaltplatten ebenso zu den dichten Scherben wie Steinzeugrohre, die allerdings zusätzlich noch glasiert sind. Feinkeramik wird vor allem in Gebäuden als Sanitärkeramik oder Wand- und Bodenfliesen eingesetzt.

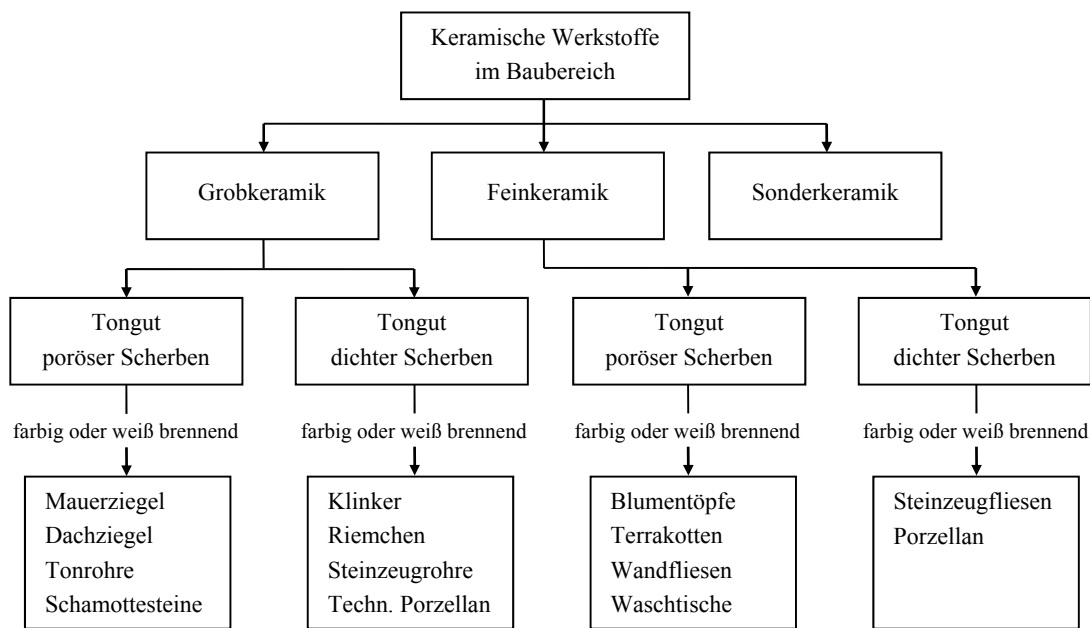


Abbildung 6-4: Übersicht Keramische Werkstoffe im Baubereich nach Rudolphi (2005)

Im Folgenden werden die Haupteinflüsse, welche die Lebensdauer keramischer Baustoffe beeinflussen, den jeweiligen Anwendungen zugeordnet:

Mauerwerk:

Da Mauerziegel in der Regel bei niedrigen Temperaturen gebrannt werden, können sie durch Temperatur und Feuchtigkeit geschädigt werden. Eine Mauerwerkswand sollte daher immer durch eine Wandbekleidung vor Feuchtigkeit geschützt sein. Kalkeinschlüsse im Ziegel können in Verbindung mit Feuchtigkeit zu Treiberscheinungen führen, während Ausblühungen durch Chloride und Sulfate entstehen können. Weitere Faktoren sind starke mechanische Beanspruchung, setzungsbedingte Veränderungen oder Schwind- und Kriechvorgänge.

Dachziegel:

Dachziegel werden wasserundurchlässig und frostsicher hergestellt, weshalb Einflüsse aus Witterung nicht berücksichtigt werden müssen. Schadensrisiken von Dachziegeln liegen vor allem im Bereich des Windsoges und des biologischen Befalls, die allerdings nicht sonderlich hoch einzustufen sind. Vereinzelt Schäden können auch durch unsachgemäße Begehungen entstehen, die zum Bruch von Ziegeln bzw. zu Schäden an der Oberfläche führen können.

Fliesen:

Fliesen und Platten aus keramischen Werkstoffen werden entsprechend der DIN EN 14411 (2006) nach Herstellungsverfahren und Wasseraufnahme in Gruppen unterteilt. Bei einer Wasseraufnahme $> 3\%$ können diese Beläge nur im frostfreien Bereich eingesetzt werden. Die Verschleißfestigkeit bzw. Abriebfestigkeit wird durch Bestim-

mung des Widerstands gegen Tiefenverschleiß bzw. Oberflächenverschleiß nach DIN EN ISO 10545-2 (1997) bestimmt. In der Norm wird nach den Anforderungen aus Begehungsfrequenz, kratzender Verschmutzung und Besohlung des Schuhwerks in Gruppen unterteilt. Spannungen in Fliesenbelägen können durch unsachgemäße Verlegung und mechanische Einwirkungen entstehen. Es können sich Risse bilden, die Wassereintritt ermöglichen und zu Frostschäden oder zu einem Aufquellen des Untergrunds führen.

6.4.5 Einflüsse auf Naturstein

Natursteine gehören neben Lehm und Holz zu den ersten Materialien, die der Mensch zum Bauen verwendet hat. Natursteine finden heutzutage vor allem als Außenbauteil an der Fassade oder als Bodenbelag Verwendung. Im Innenausbau wird Naturstein hauptsächlich als Bodenbelag verwendet. Nach ihrer Entstehungsgeschichte werden drei Hauptgesteinsgruppen unterschieden: Magmatite (Erstarrungsgesteine, wie z. B. Granit, Diorit, Basalt) sind frostbeständig und eignen sich wegen ihrer hohen Druck- und Verschleißfestigkeit als Werksteine. Sie sind extrem widerstandsfähig, aber auch schwer zu bearbeiten. Sedimente (Ablagerungsgesteine, wie z. B. Kalkstein, Quarzite, Sandstein) und Metamophe (Umwandlungsgesteine, wie z. B. Marmor, Gneis) können in ihren jeweiligen Materialeigenschaften sehr unterschiedlich sein. Die dichteren Gesteine mit hoher Druckfestigkeit und einer geringen Wasseraufnahme sind auch gegen Abrieb deutlich widerstandsfähiger einzustufen, während poröse Kalk- und Sandsteine als frostunbeständig und eingeschränkt witterungsbeständig gelten.

Die Lebensdauer eines Natursteinbelags als Innenbauteil kann durch zu hohe Abnutzung oder durch unsachgemäße Reinigung mit falschem Putzmittel beeinträchtigt werden. Weitere Schäden beruhen in der Regel auf Verarbeitungs- oder Befestigungsfehlern. Werden Natursteine im Außenbereich als Fassade oder Bodenbelag verwendet, spielen Witterung, Schadstoffe in der Luft und pflanzlicher Bewuchs eine wichtige Rolle. Gerade Schadstoffe, wie z. B. Ruß, CO₂ oder Chlorid können die Lebensdauer von Naturstein stark verringern, wobei sich sowohl im Innen- als auch im Außenbereich eine regelmäßige und sachgerechte Reinigung sehr positiv auf die Lebensdauer auswirken kann. Die wichtigste Gütesicherung besteht jedoch in einer fachkundigen bauteilgerechten Auswahl und Verarbeitung der Steine.

6.4.6 Einflüsse auf Glas

Unter Glas versteht man erstarrte anorganische Schmelzen auf der Basis von Siliziumdioxid (SiO₂) aus Quarzsand und Zusatzstoffen wie Soda, Manganoxid und Metalloxiden. Durch die Beimengung dieser Zusätze lassen sich die Eigenschaften des Glases beeinflussen. Glas ist ein sehr beständiger Werkstoff, der nur durch mechanische Belastung leicht zerstört werden kann. Witterungseinflüsse, chemische oder biologische Angriffe wirken

sich kaum auf die Lebensdauer von Glasbauteilen aus. In den meisten Fällen wird die Lebensdauer von Bauteilen aus Glas von anderen Elementen des Bauteils, z. B. Auflagerepunkte, Dichtungen oder Rahmen, bestimmt.

6.4.7 Einflüsse auf Holz

Der Einsatz von Holz im Bauwesen ist vielfältig. Neben der Anwendung als Vollholz oder Brettschichtholz für Tragstrukturen wird es häufig zu Holzwerkstoffen weiterverarbeitet. Holzfaserplatten, Sperrholz, Spanplatten oder Holzwolleleichtbauplatten sind nur einige der vielen Einsatzmöglichkeiten. Die Lebensdauer von Holzbauteilen ist v. a. bei Tragstrukturen, wie z. B. Dachstuhl ein wichtiges Auswahlkriterium. Wird Holz als Innenbauteil bei konstanten klimatischen Bedingungen eingesetzt, kann es ohne Probleme eine Lebensdauer deutlich über dem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren erreichen. Geringer wird die Lebensdauer bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit oder häufigen Temperaturschwankungen. Durch Quellen und Schwinden können sich Risse bilden. Zusätzlich können Holzschädlinge das Holz beschädigen. Sogenannte Trockenholzinsekten wie der Hausbock befallen trockenes Holz und zerstören es. Dies führt zu einer Verkürzung der Lebensdauer. Zudem können Pilze das Holz zerstören, wenn es nicht konstruktiv durch Dampfsperren oder ähnlichen Konstruktionen geschützt ist. Pilze zerstören die Zellwände der Holzzellen und verursachen damit Fäulnis. Im Endstadium führt dies zur einer regelrechten Pulverisierung des Holzes. Zum Schutz vor Insekten und Pilzbefall können Insektizide und Fungizide verwendet werden. Der Einsatz dieser Mittel verlängert die Lebensdauer von Holzbauteilen, ist aber aus ökologischer Sicht bedenklich.

Holz im Außenbereich kann von Insekten und Pilzen ebenso befallen werden wie im Innenbereich. Unterstützend wirken häufig noch die verschiedenen Witterungseinflüsse, wobei v. a. die Kombination aus UV-Strahlung und Feuchtigkeit durch Quellen und Schwinden an ungeschützten Holzbauteilen zu einer erheblichen Schädigung des Werkstoffs führt. Geschützt werden kann Holz im Außenbereich durch Anstriche, die in regelmäßigen Abständen zu erneuern sind. Deshalb ist der Einfluss aus Pflege für Holzbauteile im Außenbereich besonders zu betrachten. Gegenüber Chemikalien ist Holz im Allgemeinen sehr beständig und auch in korrosiver Atmosphäre einsetzbar. In solchen Fällen muss jedoch die Korrosionsgefahr für die verwendeten metallischen Verbindungsmittel beachtet werden.

Auch die Planung und die damit verbundene Einbausituation kann sich positiv auf die Alterung auswirken. Durch angemessene Dachüberstände beispielsweise, können die Einflüsse aus Witterung vom Holz überwiegend ferngehalten werden. Auf den Einsatz von Holz als erdberührtes Bauteil oder gar als Gründungselement sollte verzichtet werden.

Je nach Einbausituation ist Holz in unterschiedlichem Maße dem Angriff verschiedener Einwirkungen ausgesetzt. Vor diesem Hintergrund kann Holz in sogenannte Gefährdungsklassen nach DIN 68800-3 (1990) eingeteilt werden. Diese erleichtern die Beurteilung über Art und Umfang eventuell notwendiger Schutzmaßnahmen.

Tabelle 6-5: Zuordnung von Holzbauteilen zu Gefährdungsklassen nach DIN 68800-3 (1990)

Gefährdungsklasse	Beanspruchung	Gefährdung durch			
		Insekten	Pilze	Auswaschung	Moderfäule
0	Innen verbautes Holz, ständig trocken	nein	nein	nein	nein
1		ja	nein	nein	nein
2	Holz, das weder dem Erdkontakt noch der Witterung oder Auswaschung ausgesetzt ist, vorübergehende Befeuchtung möglich.	ja	ja	nein	nein
3	Holz, der Witterung oder Kondensation ausgesetzt, aber nicht in Erdkontakt	ja	ja	ja	nein
4	Holz in dauerndem Erdkontakt oder ständiger, starker Befeuchtung ausgesetzt (außer Kühltürme und Meerwasser)	ja	ja	ja	ja

Weiterhin sind die Auswahl des zu verwendenden Holzes und die Vorbehandlung von enormer Wichtigkeit für die Lebensdauer des Bauteils. Lärche oder Douglasie sind zum Beispiel Holzsorten die der Witterung sehr gut standhalten.

6.4.8 Einflüsse auf Metalle

Metalle werden im Bauwesen sowohl in der Tragstruktur, als auch für Verkleidungen oder Fassadenelemente verbaut. Sie werden dabei meist nicht in ihrer elementaren Form, sondern fast ausschließlich als Legierungen verwendet. Als Baustoff kommt Stahl, einer Legierung im Wesentlichen aus Eisen und Kohlenstoff, die größte Bedeutung zu.

Metalle unterliegen in der natürlichen Umwelt zahlreichen Einwirkungen, wobei die Korrosion den größten Einfluss auf die Lebensdauer hat. Einige Metalle, wie z. B. Edelstahl, sind nur wenig korrosionsgefährdet, andere Metalle, wie z. B. Kupfer oder Aluminium bilden eigene Schutzschichten, während vor allem Stahl durch einen Korrosionsanstrich geschützt werden muss. Durch ungünstige Kombination verschiedener Metalle kann Materialabtrag durch Kontaktkorrosion auftreten, z. B. Schraube aus Kupfer in einem Aluminiumblech in feuchter Umgebung oder Edelstahlblech mit Stahlblech verschraubt. Das edle Metall fördert dann die Korrosion im unedlen Metall durch Kontaktkorrosion, da die beiden Metalle als Anode und Kathode wirken und daher ein schwacher Strom fließt. Voraussetzung für diesen Prozess ist ein korrosives Medium zwischen den beiden Metallen, etwa Wasser, Seewasser oder bedingt auch die normale Luftfeuchtigkeit. Bei kleinen

Teilen (z. B. Schrauben) tritt das Phänomen weniger auf; es lässt sich durch isolierende Trennmittel (Fett) weiter eingrenzen.

Hier werden nun die vier im Bauwesen am häufigsten vorkommenden Metalle und ihre Einflüsse erläutert.

Eisen und Stahl

Zur Sicherstellung einer langen Lebensdauer von Bauteilen aus Eisen oder Stahl ist es wichtig, diese v. a. vor Feuchtigkeit zu schützen. Bei einigen Legierungen, mit einem sehr geringen Kohlenstoffgehalt können Flugrosterscheinungen schon nach wenigen Stunden auftreten. Gerade bei Gebäuden in Meeresnähe, bei denen mit salzhaltiger Luft gerechnet werden muss, kann die Lebensdauer von Eisen- und Stahlbauteilen deutlich verkürzt sein. Deshalb ist v. a. bei Eisen- und Stahlbauteilen auf die ordnungsgemäße Ausführung des Korrosionsschutzes zu achten. Weitere Einflüsse auf die Lebensdauer dieser Metalle haben chemischen Ursprung. Dazu zählen chemische Angriffe aus anderen Baustoffen (z. B. Gips, Magnesiabinder etc.), aus Streusalz oder anderen Schadstoffen wie Chemikalien, Exkrementen oder Ablagerungen von Luftschadstoffen. Wechselnde Beanspruchungen aus Last oder Temperaturdehnungen können eine Ermüdung des Materials verursachen. Vor allem an Befestigungsteilen bzw. an Bereichen mit Schrauben- und Nietlöchern, Schweißnähten oder Kerben führen häufige Lastwechsel zu Spannungszuständen, die schließlich einen Ermüdungsbruch zur Folge haben.

Aluminium

Aluminium ist, obwohl unedel, relativ unempfindlich gegen übliche Witterungseinflüsse, da es eine Schutzschicht aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) bildet. Durch den chemischen Prozess des Eloxierens kann diese Schutzschicht noch verstärkt werden. Aluminium ist empfindlich gegen Säuren und Basen. Durch eine nachträglich aufgebrachte Beschichtung kann Aluminium vor säurehaltiger Industrieluft oder stark salzhaltiger Meeresluft geschützt werden. Des Weiteren ist der Einsatz von Aluminium mit alkalisch reagierenden Baustoffen wie Kalkputz und Beton zu vermeiden, da es ebenso wie beim Kontakt mit edleren Metallen zu Kontaktkorrosion kommen kann.

Kupfer

Der Einsatz von Kupfer im Außenbereich und an erdberührten Bauteilen ist aufgrund seiner guten Korrosionsbeständigkeit ohne weiteren Schutz möglich. Weder Feuchtigkeit, noch salzige Meeresluft haben Auswirkungen auf die Lebensdauer. In Verbindung mit Feuchtigkeit bildet sich auf dem Kupfer eine Patina. Diese, in den meisten Fällen, grünliche Schicht schützt das Kupfer vor weiterer Korrosion. Unter Einwirkung von Ammoniak färbt sich Kupfer zunächst schwarz und bildet dann lösliches, blaues, giftiges Tetraminkupferhydroxid, weshalb der Kontakt möglichst vermieden werden sollte. Bei Kontakt mit edleren Metallen kann Kupfer, v. a. in feuchter Umgebung, mit diesen reagieren. Es

können Schäden durch Kupfer-Lochkorrosion entstehen, die zu einem vorzeitigen Ende der Lebensdauer führen. Kupfer ist gegen Kalk, Zement, Trink- und Brauchwasser beständig, in Legierungen auch gegen Meerwasser. Dagegen ist es gegen Chlorid und Kohlensäure unbeständig (Thienel (2008)).

6.4.9 Einflüsse auf Kunststoff

Kunststoffe werden im Bauwesen sehr vielseitig eingesetzt. Sie sind flexibel, dichten gut ab und sind auf Baustellen einfach einzubauen. Als Beispiele der Vielseitigkeit sind Kunststofffenster, Imprägnierungen, Dübel oder Dichtungsbahnen zu nennen. Besonders kurz ist dabei die Lebensdauer von Kunststoffen im Außenbereich. UV-Strahlung in Verbindung mit Feuchtigkeit und unterschiedlichen Temperaturbedingungen lassen die chemische Bindung aufspalten. Der Kunststoff wird spröde, was zu Rissen oder gar zum Bruch führen kann. Da auch biologischer Bewuchs, wie z. B. Algen und Moose, Kunststoffe zerstören können, sollte Feuchtigkeit in Verbindung mit UV-Strahlung auf Kunststoffen vermieden werden. Gegen Pilze und Insekten sind Kunststoffe in der Regel resistent. Biologische Einflüsse entstehen daher lediglich aus Pflanzen und in seltenen Fällen durch tierischen Befall.

Kunststoffe sind anfällig gegenüber chemischen Angriffen. Dabei kommt es auf die Art und die Zusammensetzung des Kunststoffes an, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden kann. Bauteile aus Kunststoff sollten bei jeder Lebensdaueranalyse individuell betrachtet werden.

6.5 Zusammenfassung

Kapitel 6 beschreibt die Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Bauteilen und stellt die Hintergründe sowie die möglichen Auswirkungen und Abhängigkeiten der Einflüsse untereinander dar. Grundsätzlich kann zwischen Einflüssen auf das materielle Alterungsverhalten und Einflüssen auf die immaterielle Alterung eines Bauteils unterschieden werden. Basierend auf den Faktorkategorien nach DIN ISO 15686 werden in Abschnitt 6.2 die materiellen Einflussfaktoren in sieben Kategorien eingeteilt und die jeweiligen Einflüsse beschrieben. Neben der eigentlichen Bauteilqualität sind v. a. die Umgebungs- und Nutzungsbedingungen für eine Verkürzung oder Verlängerung der Lebensdauer von Bauteilen verantwortlich.

Immaterielle Einflüsse, wie z. B. modische Obsoleszenz oder technische Überalterung, können im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden. Sie werden deshalb nur der Vollständigkeit halber in Abschnitt 6.3 kurz angerissen.

Einflüsse auf das materialspezifische Alterungsverhalten werden abschließend in Abschnitt 6.4 für typische Baumaterialien erläutert und diskutiert. Es werden Hinweise ge-

geben, welche Einflüsse maßgeblich die Alterung der verschiedenen Materialien beschleunigen und welche Schutzmaßnahmen getroffen werden können. Diese Auflistung kann keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, da die Komplexität der Thematik den Rahmen dieser Arbeit deutlich überschreiten würde.

7 ERWEITERUNG DER DATENGRUNDLAGE

7.1 Einführung

Nach der theoretischen Analyse und Ausarbeitung einer strukturierten Bauteilliste wird in diesem Kapitel die Erweiterung der Datengrundlage durch praxisnahe Erfahrungswerte zu Lebensdauern und Einflussgrößen auf Basis einer Datenerhebung dargestellt. Statistische Datenerhebungen lassen sich hinsichtlich der Umfragemethode in verschiedene Umfragearten aufteilen:

- Face-to-face
- Telefonisch
- Schriftlich auf postalischem Weg
- Schriftlich per E-Mail
- Online-Umfragen

Ziel aller Methoden ist es, einen möglichst repräsentativen Teil der statistischen Masse als Stichprobe zu erfassen. Die Qualität der gewählten Umfragemethodik lässt sich anhand verschiedener Gesichtspunkte erkennen. Dazu gehört unter anderem die Auswahl der Teilnehmer, die Erhebungsmethode, Reliabilität, Validität und Objektivität der Fragen sowie die Datenanalyse (siehe dazu auch Abschnitt 7.4).

Unter Berücksichtigung der Zielgruppe (Hersteller, Sachverständige, Dienstleister, FM-Anbieter) und der zeitlichen Randbedingungen fiel die Entscheidung auf eine zweigeteilte Erhebung, bei der zunächst ein Fragebogen per E-Mail versendet wird, um erste Schätzwerte sowie eine prinzipielle Bereitschaft und Eignung der Umfrageteilnehmer abzufragen. Im zweiten Teil der Datenerhebung werden „face-to-face“- und Telefon-Interviews durchgeführt, bei denen alle erforderlichen Themen im persönlichen Gespräch erarbeitet werden konnten.

7.2 Entwicklung von Fragebögen und Interviewleitfaden

Die Erstellung der einzelnen Fragebögen wird nach einem vorher konzipierten Ablauf durchgeführt. Zunächst werden dazu die Untersuchungsziele präzisiert. Für die jeweiligen Bauteilgruppen ist dies die Einschätzung der Lebensdauern sowie die maßgebenden Einflussgrößen und Instandhaltungsmaßnahmen. Danach werden übergeordnete Themen und Abschnitte bestimmt und zu diesen Blöcken Fragen erstellt. Maßgabe für die Entwicklung war, den Fragebogen möglichst übersichtlich zu gestalten, um den Experten und Praktikern keinen unnötigen Zeitaufwand abzuverlangen und damit die Teilnahme an der Umfrage von vornherein abzulehnen. Es werden deshalb Fragebögen mit max. 12 Fragen auf

zwei bis drei DIN A4 Seiten erstellt, bei denen abschließend die Bereitschaft zu einem persönlichen Interview und vorhandene Projekterfahrung abgefragt wird (siehe Musterfragebogen in Anhang G). Zusätzlich zu den eigentlichen Fragen wurde eine Einleitung zum Fragebogen entwickelt, die unter anderem die Begrüßung und die Vorstellung des Untersuchungs- bzw. Evaluationsziels sowie eine abschließende Dankesformel enthält. Es wurden Pretests sowohl innerhalb des Instituts für Massivbau als auch mit ausgewählten Experten aus der Praxis durchgeführt, um sowohl methodische als auch eventuelle fachliche Mängel und Problembereiche innerhalb der Fragebögen aufzudecken.

Phase 0 → Vorbereitung / Kontaktaufnahme	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wie ist der Kontakt zustande gekommen? ▪ Warum wurde diese Person ausgewählt? ▪ Was ist das Ziel der Erhebung? ▪ Wie lange wird das Interview ca. dauern? ▪ Wo soll das Gespräch stattfinden?
Phase 1 → Gesprächseinstieg	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kurze Vorstellung der eigenen Person ▪ Was passiert mit den Daten? Hinweis auf Anonymität ▪ Wie lange wird das Gespräch ungefähr dauern? ▪ Was wird von der interviewten Person erwartet?
Phase 2 → Hauptteil	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Themen: <ol style="list-style-type: none"> 1) Lebensdauerschätzwerte von Bauteilen mit Fragen zum prinzipiellen Schichtaufbau 2) Einflussgrößen und Auswirkungen auf die Lebensdauer 3) Konkrete Projektangaben und Erfahrungen (inkl. Randbedingungen) 4) Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen 5) „Wiederbeschaffungskosten in % nach ca. X Jahren“ ▪ Wichtige Umfrageprinzipien: <ol style="list-style-type: none"> a) vom Allgemeinen zum Speziellen b) vom Unverfänglichen zum „Heiklen“ c) „Offene Fragen“ stellen ▪ Nachfragen ausdrücklich erlaubt ▪ Mehrere Fragen und Eventualfragen je Themenblock be-reithalten ▪ Nachfrage nach persönlichen Erfahrungen
Phase 3 → Generalzusammenfassung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bogen über das ganze Interview spannen ▪ Gibt es noch Ergänzungen des Interviewpartners? Fühlt er sich verstanden?
Phase 4 → Gesprächsabschluss	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dank für die Bereitschaft, ein Interview zu geben ▪ Wie geht es weiter? ▪ Gesamtauswertung und Präsentation der Ergebnisse?
Phase 5 → Nachgespräch und Verabschiedung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Was wird noch nach dem Interview gesprochen? ▪ Zusatzprotokoll wichtig <ol style="list-style-type: none"> a) Welche Milieubedingungen fallen auf? b) Was waren die Rahmenbedingungen? c) Wie ist das Gespräch verlaufen?

Abbildung 7-1: Interviewleitfaden der Datenerhebung

Für die Durchführung von persönlichen Interviews und der Abfrage von weiteren Projektangaben wurde ein Interviewleitfaden entwickelt, um eine Vergleichbarkeit der Gespräche zu gewährleisten. Es wurden halbstrukturierte Interviews durchgeführt, bei denen nur ein Teil der Fragen vorformuliert war. Die Thematik der Befragung war festgelegt und im Interviewleitfaden nach verschiedenen Bereichen gegliedert. Zweck des Leitfadens ist es, dem Interviewer die Übersicht über das Thema zu garantieren und ihn davor zu bewahren, wichtige Bereiche auszulassen. Die Fragen wurden in ihrer Reihenfolge festgelegt und in Themengruppen gebündelt.

Somit konnte anhand der bereits bestehenden Fragebögen und der aufgeführten Punkte ein Gesprächsleitfaden für die jeweiligen Produktgruppen entwickelt werden, die auch weniger geschulten Interviewern die Durchführung der Gespräche ermöglichen. Abbildung 7-1 zeigt beispielhaft den Interviewleitfaden, der in Verbindung mit den bauteilabhängigen Fragebögen die Gesprächsbasis der Datenerhebung bildet.

7.3 Durchführung und Ergebnisse der Erhebung

Die Datenerhebung wurde zunächst als E-Mail-Umfrage anhand einer selbst erstellten Firmenliste durchgeführt. Datenbasis der Firmenliste waren verschiedene Internetportale, wie z. B. die Webpräsenz der IHK oder der „Gelben Seiten“. Die Liste beinhaltet in Summe über 2000 Firmen und Büros aus den Bereichen Hersteller, Sachverständige, Dienstleister und FM-Unternehmen zu allen erforderlichen Produktgruppen. Die E-Mail-Umfrage wurde im Juni 2009 gestartet und lief inklusive mehrerer Erinnerungen bis zum Juni 2010. Nach dem Versand der ersten Fragebögen wurden „ausgewiesene“ Experten und Sachverständige sowie FM-Anbieter in einer zweiten Runde telefonisch kontaktiert, um in einem persönlichen Gespräch weitere und genauere Ergebnisse zu erzielen. Zusätzlich zu den Expertengruppen wurden auch konkrete Projektergebnisse gesammelt, von denen möglichst auch besondere Einflüsse und Umgebungsbedingungen mit abgefragt werden sollten.

Die Auswahl der Experten aus verschiedenen Prozessbereichen soll eine möglichst ausgewogene Einschätzung der Lebensdauern und Einflussgrößen gewährleisten. Die jeweiligen Interviews wurden unter Zuhilfenahme des Interviewleitfadens und der entsprechenden Fragebögen durchgeführt. Sie dauerten in der Regel ca. 30 Minuten, konnten sich aber durchaus auf über 60 Minuten ausdehnen. Nach Prüfung der Ergebnisse auf Plausibilität konnten die Umfragedaten in die abschließende Lebensdauertabelle aufgenommen werden, so dass sich zusammen mit den Ergebnissen der Literaturrecherche eine Datengrundlage hinlänglicher Breite als Kalkulationsgrundlage ergab. Im Rahmen der Auswertung aller Interviews und E-Mail-Befragungen hat sich in Summe eine Beteiligung von 8% ergeben. Somit kommen zu den bereits vorhandenen Werten aus der Literaturrecherche, bis auf wenige Ausnahmen, mindestens 15 weitere Lebensdauerangaben je

Bauteil hinzu. Als Zielwerte für die statistische Auswertung wurden die Anzahl der Umfragewerte mit mindestens 15 und der Variationskoeffizient mit $\leq 0,40$ festgelegt. Diese Grenzen wurden für annähernd alle Bauteile erreicht. Als weitere Kenngrößen werden die Standardabweichung der Lebensdauern, das 95%-Konfidenzintervall und die Abweichung zwischen Umfrage- und Literaturwerten untersucht. In der folgenden Abbildung 7-2 sind beispielhaft drei Standardbauteile im Bereich Fenster mit den Werten aus Literatur und Umfragen gegenübergestellt.

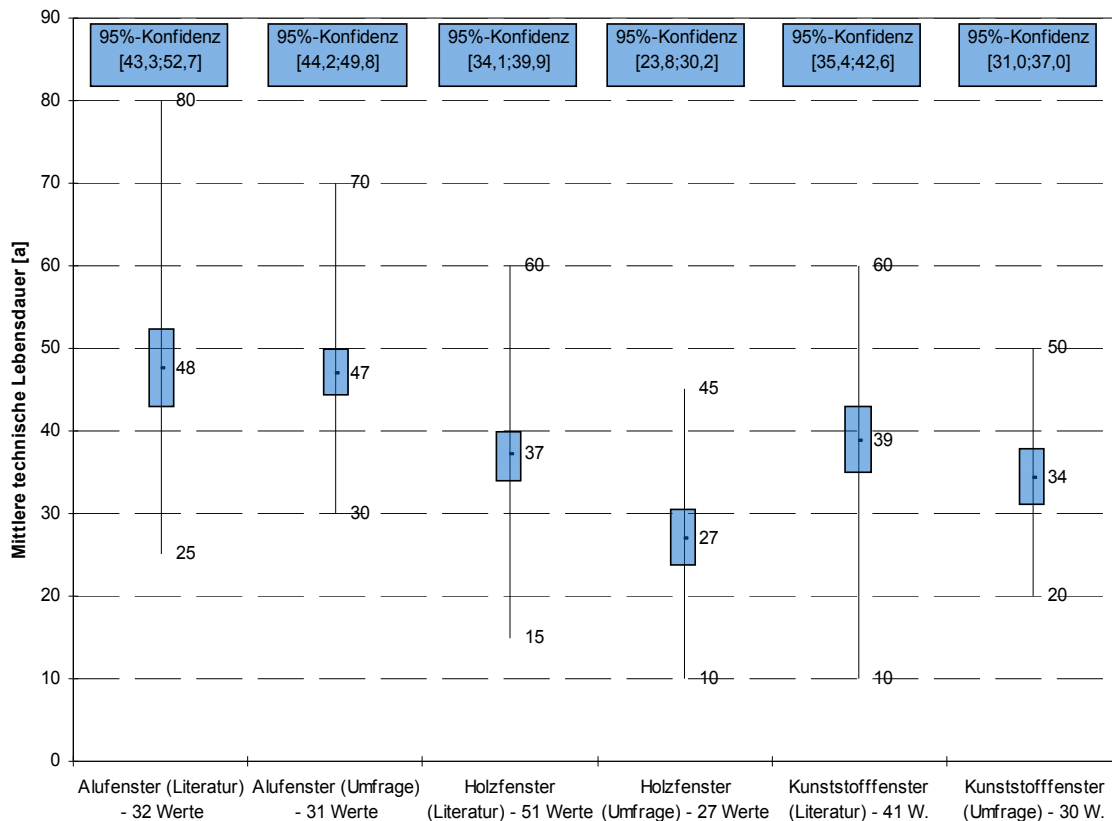


Abbildung 7-2: Vergleich der mittleren technischen Lebensdauer verschiedener Standardfenster

Es lässt sich festhalten, dass die Abweichungen zwischen den ermittelten Umfragewerten und den aktuellen Literaturwerten relativ gering sind. Die Tendenz liegt eher bei einer etwas vorsichtigeren Einschätzung durch die Expertengruppen. Bei ca. 80% der Bauteile liegen die Abweichungen im Bereich von $\pm 30\%$ um den Mittelwert.

Die Auswertung der einzelnen Fragebögen erfolgt getrennt nach Dienstleistern, Herstellern, FM-Unternehmen, Sachverständigen und Angaben aus einzelnen konkreten Projekten, so dass die Daten getrennt bewertet werden können.

Die überwiegenden Tendenzen der einzelnen Gruppen lassen sich durch die folgenden Gegenüberstellungen festhalten:

- Literaturwerte > Umfragewerte
- Herstellerangaben > Werte von Sachverständigen (SV)
- SV-Angaben > Einschätzungen von Dienstleistern
- Dienstleisterangaben > Projektangaben u. FM-Unternehmen

Somit lässt sich zusammenfassen, dass die Hersteller die Lebensdauer ihrer Produkte gerne etwas zu hoch einschätzen, während FM-Unternehmen und Projektleiter die Lebensdauern sehr niedrig bewerten. Die geringen Lebensdauern aus den Projektbefragungen und von FM-Unternehmen lassen sich psychologisch durch die negative Verstärkung erklären. Jeder Projektleiter hat wahrscheinlich zu nahezu jedem Bauteil ein schlechtes Beispiel im Sinn, dass ihn zu einer vorsichtigeren Einschätzung kommen lässt, als ein Handwerker, der ein Bauteil hergestellt oder verarbeitet hat oder ein Sachverständiger, der vielleicht nur „echte Bauschäden“ beurteilen muss, die nicht aus der „normalen“ Bauteilalterung entstehen. Die Einschätzungen der einzelnen Gruppen werden anhand der anschließenden Abbildung 7-3 für verschiedene Key-Komponenten nochmals verdeutlicht:

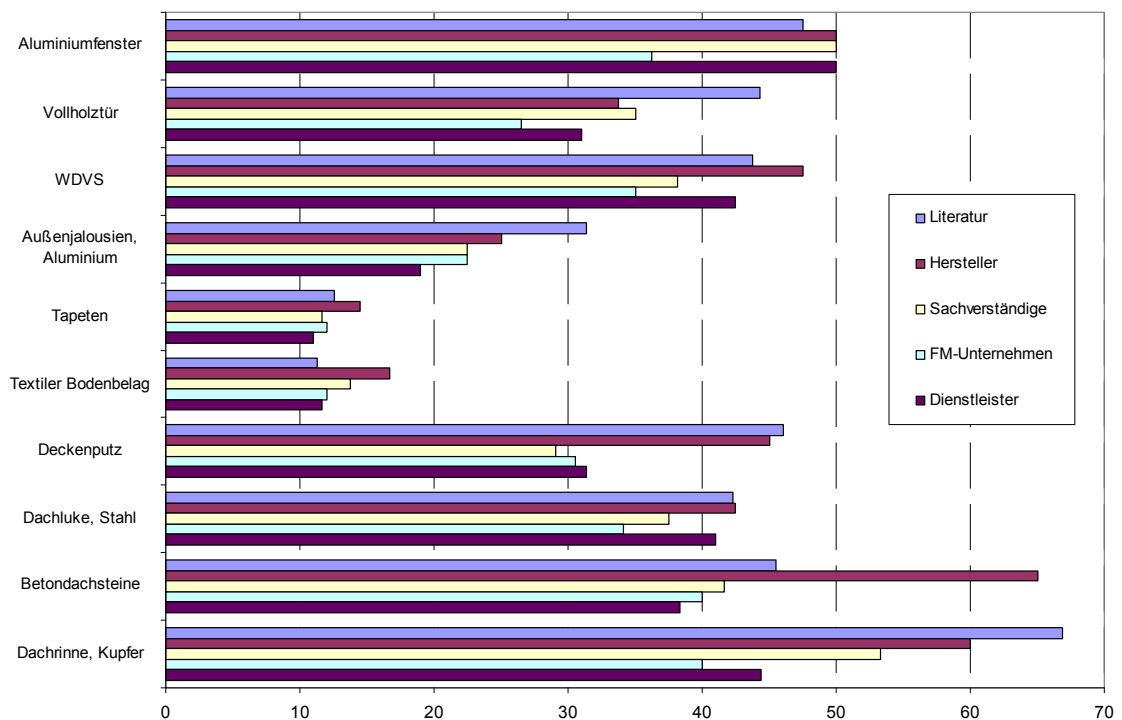


Abbildung 7-3: Mittlere Lebensdauer einzelner Key-Komponenten sortiert nach Datenherkunft

Neben den Angaben zur Lebensdauer von Bauteilen wurden auch mögliche Einflussfaktoren abgefragt, die sich auf die Lebensdauer der Bauteile auswirken. Die Einschätzung erfolgte rein subjektiv in vier Stufen „0, X, XX, XXX“, die sich von „hat keinen Einfluss“ bis zu „hat sehr großen Einfluss“ auf die Lebensdauer einteilen lässt. Diese Einflüsse wurden anschließend in Faktoren auf die Lebensdauer umgerechnet, die die abgefragten

Durchschnittswerte der mittleren Lebensdauer entsprechend verlängern oder verkürzen können. Gestaffelt nach den verschiedenen Expertengruppen ergeben sich beispielhaft für die Bauteilgruppe Fenster die folgenden Einflussmöglichkeiten auf die Lebensdauer nach Abbildung 7-4. Es zeigen sich deutliche Unterschiede in der Gewichtung der Kategorien untereinander, während die Unterschiede zwischen den verschiedenen Expertengruppen eher gering sind.

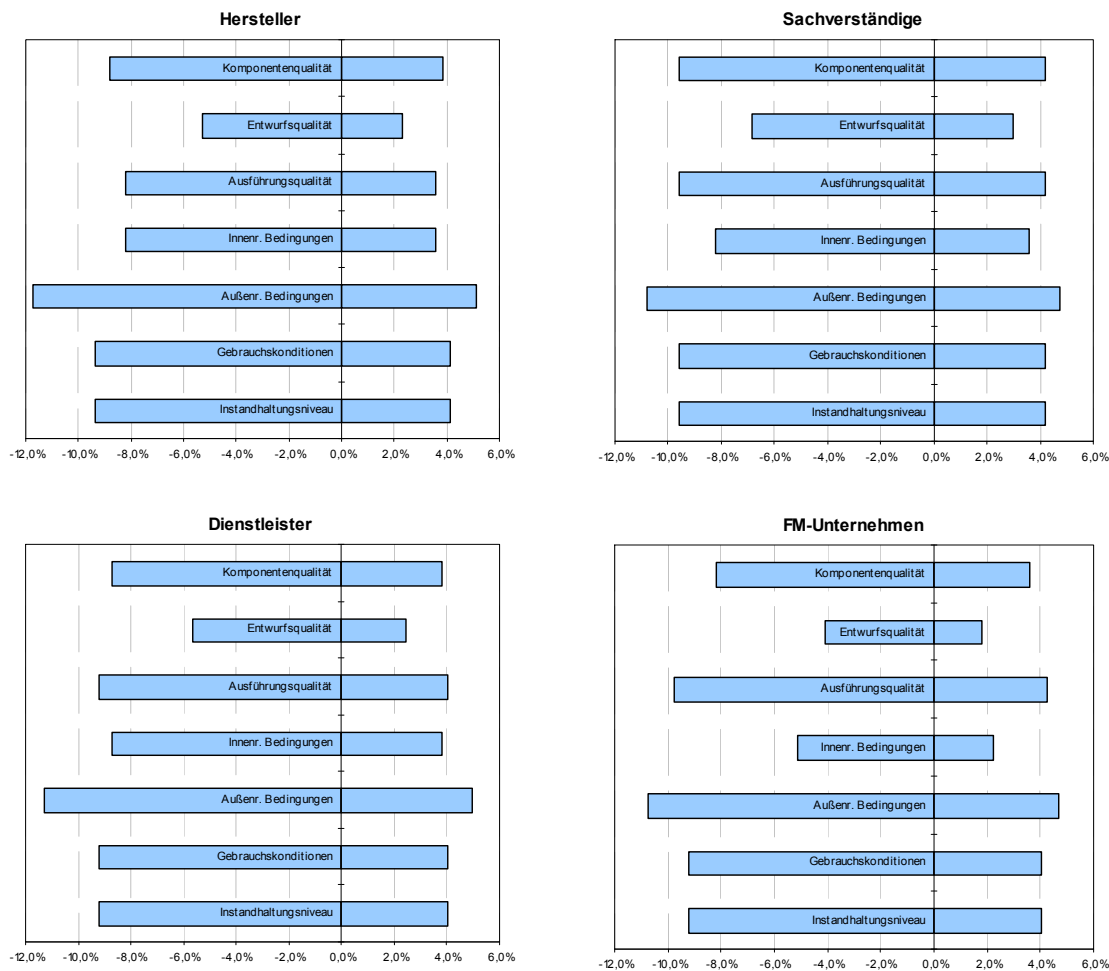


Abbildung 7-4: Verteilung der Einflussgrößenkategorien am Beispiel Fenster sortiert nach Datenherkunft

Abschließend wurde in jedem Fragebogen ein Vorschlag für die Wartung und Instandhaltung der entsprechenden Bauteile abgefragt. Dieser Vorschlag lässt zum einen auf die zeitliche Einordnung der Maßnahmen schließen und zum anderen werden die üblicherweise erforderlichen Tätigkeiten beschrieben, so dass aus diesen Ausführungen, zusammen mit den Lebensdauern aus den einzelnen Komponenten der Bauteile, auf die notwendigen Prozentwerte und Instandsetzungszyklen bei der Modellierung geschlossen werden kann.

7.4 Datenqualität nach DIN ISO 15686-8 (2008)

Nach den bereits genannten Problemen mit der Qualität der Literaturdaten, war es auch bei den Umfragedaten nicht immer möglich, alle erforderlichen Randbedingungen zu berücksichtigen. Trotzdem, auch wenn die verfügbaren Daten z. T. große Streuungen aufweisen, können diese Werte eine wichtige Informationsquelle bilden. Speziell ist dies der Fall, wenn fundierte Daten, die auf Basis von Testverfahren gemäß Teil 2 (2001) der DIN ISO 15686 generiert wurden, nicht zur Verfügung stehen.

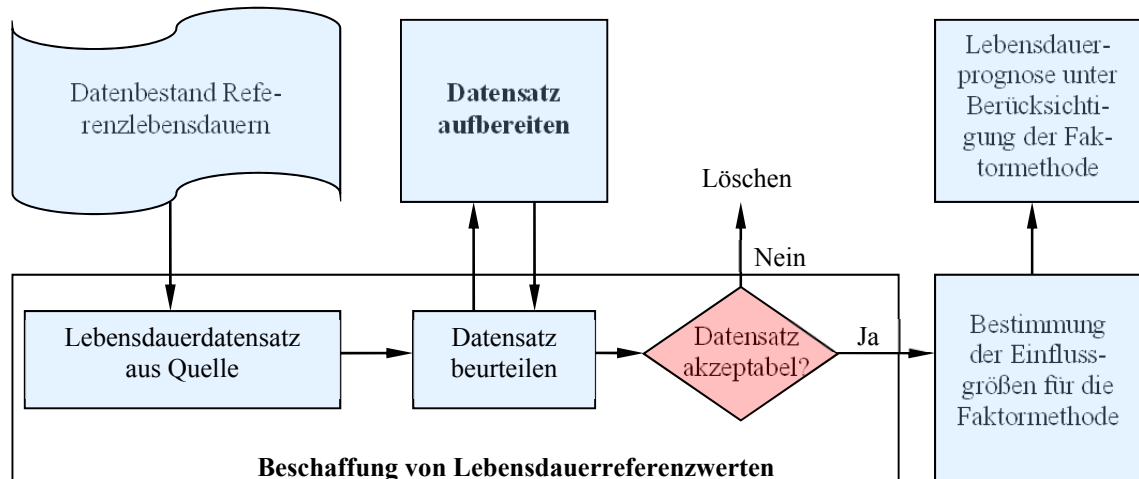


Abbildung 7-5: Prozess der Lebensdauerdatenauswahl gemäß DIN ISO 15686-8 (2008)

Ein Lebensdauerdatensatz bei einer Datenerhebung sollte nach DIN ISO 15686-8 (2008) neben einer allgemeinen Beschreibung des Materials (oder der Komponente) Angaben zur Vorgehensweise der Datenerhebung enthalten. Des Weiteren sind mögliche Gebrauchskonditionen, die kritischen Eigenschaften des Bauteils sowie deren Leistungsanforderungen von Interesse. Diese Daten stehen aber nur in den seltensten Fällen vollständig zur Verfügung. Mögliche Prozesse der Datenauswahl sind in Abbildung 7-5 (Lebensdauerdaten) und Abbildung 7-6 (generelle Daten) dargestellt.

Die zur Verfügung stehenden Lebensdauerdatensätze werden vor ihrer Verwendung auf Qualität und Konsistenz überprüft. Entsprechende Prüfkriterien sind in den Abschnitten 4.3.3.2 - 4.3.3.4 des Teils 8 der Normenreihe DIN ISO 15686 enthalten. Auf die Verwendung eines Datensatzes wird z. B. verzichtet, wenn

- die betrachteten Schädigungsfaktoren nicht vollständig berücksichtigt wurden bzw. nicht den zu untersuchenden Bedingungen entsprechen,
- die Leistungsanforderungen nicht denen des zu untersuchenden Objekts entsprechen,
- die Referenznutzungsbedingungen nicht den objektspezifischen Nutzungskonditionen entsprechen.

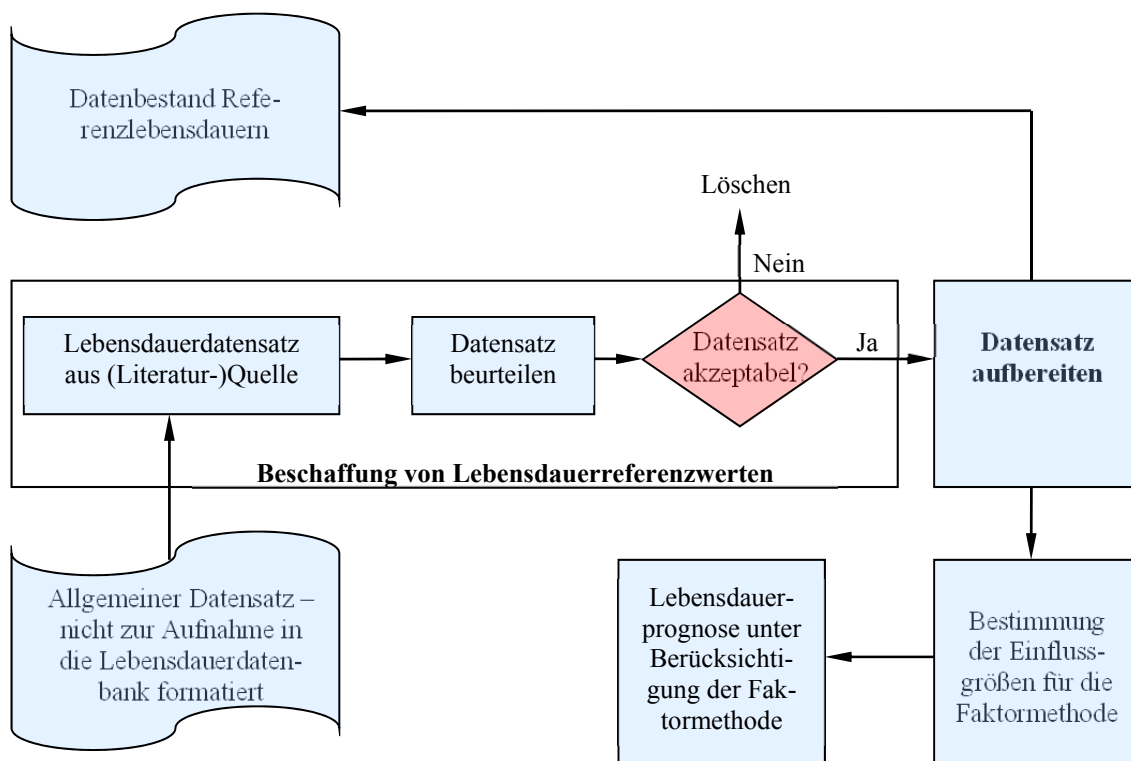


Abbildung 7-6: Prozess der Auswahl allgemeiner Daten nach DIN ISO 15686-8 (2008)

Zur Anpassung von Referenznutzungsbedingungen an die objektspezifischen Nutzungskonditionen wird auf die Faktorenmethode (siehe Kapitel 4.4) verwiesen. Die Faktor-Klassen werden, soweit möglich, über Intensitäten und Auswirkungen von Schädigungsfaktoren quantifiziert. Falls eine quantitative Information für die Nutzungsbedingungen innerhalb der Faktor-Klasse fehlt, so kann auf eine qualitative Bewertung zurückgegriffen werden.

Tabelle 7-1: Beschreibung der Einstufung von Nutzungskonditionen für Faktor-Kategorien nach DIN ISO 15686-8 (2008)

Nutzungsbedingungen	Beschreibung (Level/Auswirkung)	Anmerkung
0	nicht verfügbar	Sollte nicht für die Faktor-Kategorie „Bauteilqualität“ angewandt werden.
1	sehr hoch / sehr unbedeutend	
2	hoch / unbedeutend	
3	normal	
4	niedrig / schwerwiegend	
5	sehr niedrig / sehr schwerwiegend	
NA	nicht anwendbar	Sollte normalerweise nicht angewandt werden. Im Bereich der Kategorie „Instandhaltungsqualität“ kann es einen Fall geben, bei der Nutzungsgrad „NA“ angegeben ist: Bauteile der Konstruktion, für die eine Instandhaltung nicht möglich ist.

Die Ermittlung adäquater Werte erfolgt in Abhängigkeit der Nutzungsgrade (siehe Tabelle 7-1) und unter Berücksichtigung der verfügbaren Informationen. Sind weder quantitative noch qualitative Informationen verfügbar, soll der Wert „0“ gewählt werden.

Werte, die in Zusammenhang mit der Lebensdauerabschätzung stehen, sollten immer mit einem Zeitbezug angegeben werden. Dies ist unabhängig davon, ob es sich um Einzelwerte oder Werte mit unter Umständen großer Streuung handelt. Ein vollständiger Lebensdauerdatensatz für die Lebensdauerplanung sollte somit die folgenden Informationen nach Tabelle 7-2 beinhalten:

Tabelle 7-2: Notwendige Angaben eines vollständigen Lebensdauerdatensatzes

Allgemeine Angaben	Informationen, die die Identifikation des Datensatzes ermöglichen, wie z. B. <ul style="list-style-type: none"> - eine eindeutige Nummer oder ein Code, - das Datum der Erstellung oder der Bewertung, - Name und Qualifikation des Erfassers.
Zweck der Untersuchung	Informationen zur Untersuchung, Ausnahmen, Verwendungs- / Erstellungszweck des Datensatzes
Material/Komponente(n)	Allgemeine Beschreibung des Materials/ der Komponente(n)
Methodik	Genaue Beschreibung der eingesetzten Methoden (z. B. Tests, Gebäudeinspektion etc.)
Referenz-Nutzungskonditionen	<ul style="list-style-type: none"> - für die Faktoren A, B, C, F und G einzelne quantitative Werte, bzw. qualitative Werte wenn quantitative nicht zur Verfügung stehen; - für die Faktoren D und E numerische Angaben, die die Referenzlebensdauer als Funktion der Intensität der kennzeichnenden Schädigungsfaktoren beschreibt, oder die Intensität darstellt, sowie eine einfache Beschreibung der klimatischen Zone, des Grundstücks, der Region, etc.
Schädigungsfaktoren	Informationen über alle Faktoren, die signifikant sein können
Ausnahmen	Nennung von Faktoren, von denen keine kritischen Auswirkungen zu erwarten sind
Kritische Eigenschaften und Leistungsmerkmale	Auflistung der kritischen Eigenschaften, Leistungsmerkmale und der jeweiligen Ausnahmen
Bezugslebensdauer	Angaben, ob es sich um einzelne Werte oder statistische Verteilungen handelt. Falls es sich um eine statistische Verteilung handelt ist, diese zu beschreiben.
Datenqualität	Angaben, ob und wie eine Prüfung durch unabhängige Dritte stattgefunden hat
Verlässlichkeit der Daten	Beschreibung der Datenquelle und Einschätzung der Zuverlässigkeit
Evtl. weitere Informationen, Referenzen	

Die Auswahl der Datensätze erfolgt in Abhängigkeit des Zwecks der Ermittlung, der vorliegenden Daten, Modelle und Fähigkeiten der Beteiligten. Die geschätzte Lebensdauer wird mit einer Jahreszahl und der separaten Zugabe eines Sicherheitsintervalls angeben.

7.5 Datenupdate nach Bayes

Die Qualität der Basisdaten ist nicht nur im Sinne der Qualität von einzelnen Lebensdauerdatensätzen zu sehen (siehe Datenqualität nach Abschnitt 7.4), sondern die Qualität der Daten muss auch als Ganzes für das jeweilige Bauelement gewährleistet sein, um somit eine Grundlage zu bilden, die eine sinnvolle Prognose der Lebensdauer für mögliche Lebenszyklusbetrachtungen zulässt. Anhand der Literaturrecherche konnten für nahezu alle Bauelemente eine mehr oder minder große Anzahl an Werten für die technische Lebensdauer ermittelt werden. Diese Werte sind jedoch häufig breit gestreut oder basieren auf veralteten Angaben. Vor diesem Hintergrund wurde für die maßgebenden Bauteile der Baukonstruktion eine Datenerhebung unter verschiedenen Expertengruppen durchgeführt (siehe auch Abschnitt 7.3). Unter Verwendung dieser neuen Daten konnte mit dem Verfahren des „Data Updating“ nach Bayes (siehe Abschnitt 2.6.4) die Datenbasis erweitert und die Datenqualität zum Teil erheblich verbessert werden.

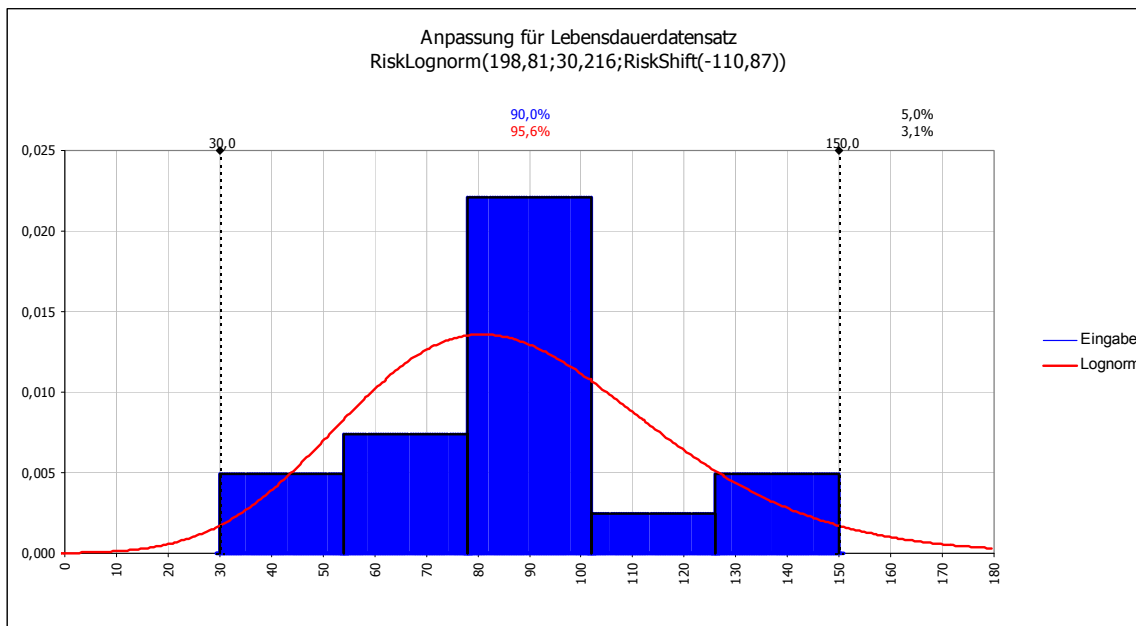


Abbildung 7-7: Anpassung einer Lognormalverteilung an Lebensdauerdaten aus der Literatur am Beispiel von Fensterbänken aus Naturstein (Programmsystem „@risk“, Version 5.7.0, Industrial Edition, Palisade Corporation)

Die Literaturwerte mit ihrer statistischen Verteilung werden als Priorinformationen verwendet, die durch die Ergebnisverteilungen von Herstellern, Sachverständigen, Dienstleistern und FM-Unternehmen „upgedatet“ und somit schrittweise verbessert werden, da die Posterioridichte des jeweils letzten Schritts als Priordichte des neuen Prozesses dient. Das Updaten ist besonders effektiv, wenn nur wenige Vorinformationen vorliegen und die zu schätzenden Parameter über eine große Streuung verfügen. Die Verteilungen der Priorwerte werden als lognormalverteilt angenommen (siehe Abbildung 7-7), da die Ergebnisse aus Literaturrecherche und Umfragen durch eine Lognormalverteilung sehr gut an-

genähert werden konnten und für lognormalverteilte Priorinformationen eine mathematisch geschlossene Lösung möglich ist. Mit den in Abschnitt 2.6.4 angegebenen Gleichungen (2.56) bis (2.73) ist es somit möglich, die statistischen Momente aus der Datenerhebung unter Einbeziehung der Literaturrecherche zu schätzen. Abbildung 7-8 zeigt am Beispiel der Lebensdauer von Schallschutz-Isolierglas die Verbesserung der Literaturwerte durch das Update anhand der Expertengruppen. Im vorliegenden Fall werden die Priorwerte $m_{Prior} = 30,0 \text{ Jahre}$ und $s_{Prior} = 8,20$ durch das Data Updating auf $m_{Posterior} = 30,9 \text{ Jahre}$ und $s_{Posterior} = 6,74$ verbessert.

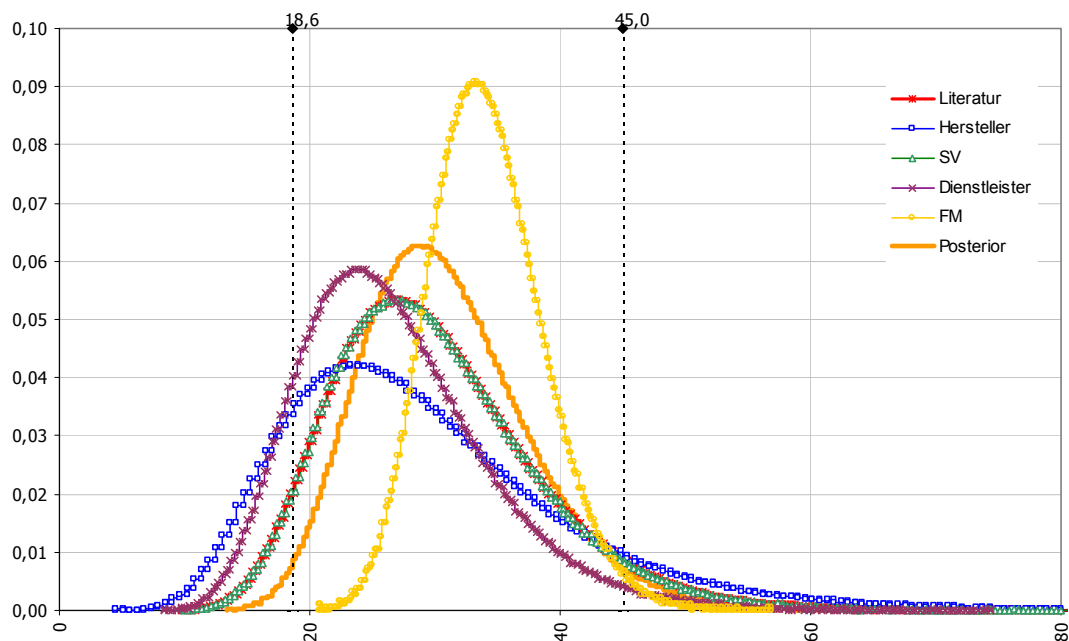


Abbildung 7-8: Update von Lebensdauerdaten aus der Literatur am Beispiel von Schallschutz-Isolierglas (Programmsystem „@risk“, Version 5.7.0, Industrial Edition, Palisade Corporation)

Analog zu diesem Vorgehen werden die Einschätzungen der Experten zu den Auswirkungen der Einflussgrößen qualitativ verbessert. Dazu werden die Ergebnisse der Hersteller als Priorinformationen verwendet, um sie durch die Angaben von Sachverständigen, Dienstleistern und FM-Unternehmen zu optimieren.

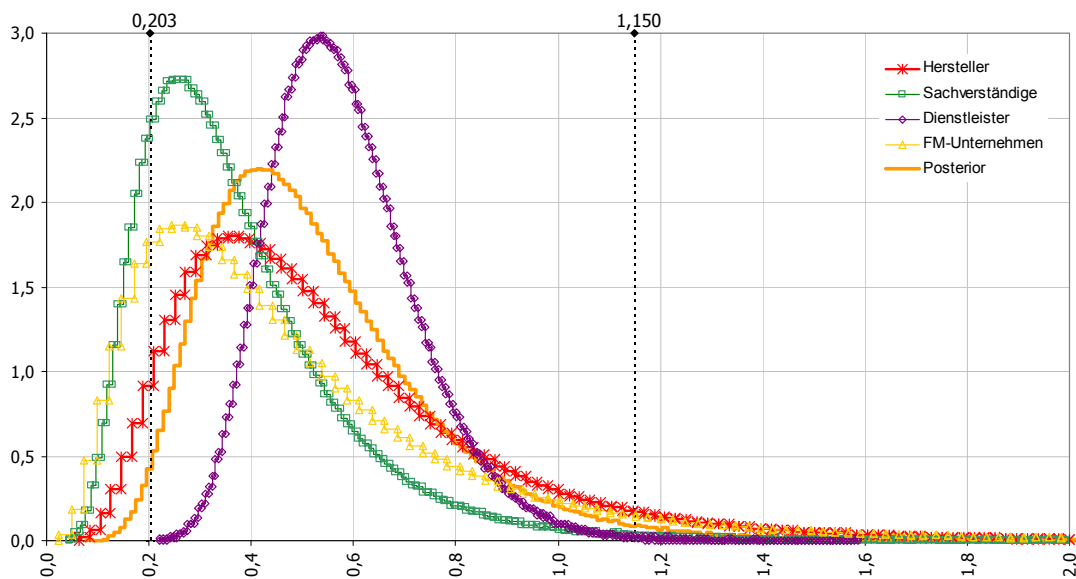


Abbildung 7-9: Update des Wirkungsfaktors aus Herstellerangaben am Beispiel von Windeinwirkung auf Fassaden (Programmsystem „@risk“, Version 5.7.0, Industrial Edition, Palisade Corporation)

Am Beispiel der Auswirkungen von Windeinwirkung auf Außenwandbekleidungen wird in Abbildung 7-9 die Verbesserung der Herstellerangaben aufgezeigt. Im vorliegenden Fall werden die Priorwerte $m_{Prior} = 0,556$ und $s_{Prior} = 0,314$ durch das Data Updating auf $m_{Posterior} = 0,531$ Jahre und $s_{Posterior} = 0,222$ verbessert.

7.6 Zusammenfassung

Im ersten Teil des vorliegenden Kapitels wird die Erweiterung der Datengrundlage anhand von Expertenbefragungen diskutiert und erläutert. Dazu wird die Entwicklung von Fragebögen und Interviewleitfaden beschrieben, die die Basis der Datenerhebung bilden. Mit der Anzahl von mindestens 15 Lebensdauerdaten und einem Variationskoeffizient kleiner 0,40 werden statistische Grenzwerte festgelegt, die eine ausgeglichene Datenqualität über alle Produktgruppen sicherstellen. Die Ergebnisse werden getrennt nach Dienstleistern, Herstellern, FM-Unternehmen und Sachverständigen ausgewertet, um einen Vergleich der einzelnen Expertengruppen zu ermöglichen. Es lässt sich festhalten, dass Hersteller die Lebensdauer ihrer Produkte im Mittel etwas zu hoch einschätzen und FM-Unternehmen und Projektleiter die Lebensdauern sehr niedrig bewerten. Die Abweichungen zwischen den ermittelten Umfragewerten und aktuellen Literaturwerten sind relativ gering. Die Tendenz liegt bei einer etwas vorsichtigeren Einschätzung durch die Expertengruppen.

Nach einem kurzen Exkurs zur Datenqualität nach DIN ISO 15686-8 (2008), in dem die notwendigen Angaben eines vollständigen Lebensdauerdatensatzes erarbeitet werden, folgt in Abschnitt 7.5 die Beschreibung der Datenverbesserung nach dem Theorem von

Bayes. Bei diesem Verfahren zur Schätzung von Parametern werden die Lebensdauerdaten aus Literatur als Vorinformationen verwendet, die durch die Ergebnisse der einzelnen Expertenbefragungen geschärft werden. Es zeigt sich, dass sowohl der Wert der mittleren technischen Lebensdauer als auch die Streuung der ursprünglichen Daten durch das Updaten signifikant verbessert wird. Zur Einschätzung der Einflussgrößen lagen keine Priorwerte aus der Literatur vor, so dass die Angaben der Hersteller als Vorinformationen verwendet wurden, die durch Sachverständige, Dienstleister und FM-Unternehmen verbessert wurden.

Da der Grad der Verbesserung von den jeweiligen Streuungen der Basisdaten abhängt, kann kein globaler Faktor angegeben werden. Eine Verbesserung des Variationskoeffizienten um 5 – 30% ist durchaus häufig zu erkennen, wobei auch einige Verschlechterungen (Vergrößerungen) des Variationskoeffizienten zu erwähnen sind. Derartige Änderungen des Variationskoeffizienten sind durch große Unterschiede zwischen Literatur- und Umfragewerten begründet. Auf Grund der verbesserten Datenaktualität werden diese Werte mit größerem Variationskoeffizient trotzdem in die Bauteilliste übernommen.

8 VORHERSAGE OBJEKTSPEZIFISCHER LEBENSDAUERN

8.1 Einführung

In Kapitel 4 wurden die bisherigen Ansätze zur Ermittlung der Lebensdauer von Bauteilen hinreichend vorgestellt und diskutiert. Das Modell der Faktoren-Methode aus DIN ISO 15686 hat sich dabei grundsätzlich als sinnvoll erwiesen, so dass sich das in dieser Arbeit vorgeschlagene Modell an dieser Methode orientiert.

Bei der Entwicklung des Modells wurde versucht, die Schwächen der Faktormethode auszugleichen und die Anwendung in der Praxis zu erleichtern. Fehlende Angaben zu den Referenzlebensdauern wurden durch eine Datenerhebung aktualisiert um eine ausreichende Anzahl statistisch belastbarer Datensätze zu erhalten. Es wurden die Unterschiede in der Relevanz der einzelnen Einflussgrößen durch die Datenerhebung ermittelt, was bei der Faktormethode durch ihre gleichmäßige Wichtung aller Faktoren gerne bemängelt wird. Als entscheidende und wichtigste Neuerung wird die Begrenzung der Auswirkungen aus Einflussgrößen angesehen. Eine Begrenzung der berechneten spezifischen Lebensdauer durch die aus der Datenerhebung ermittelten minimalen und maximalen Werte der Lebensdauer sollte zu einer erheblichen Verbesserung des Modells und somit zu einer höheren Akzeptanz in der Praxis führen.

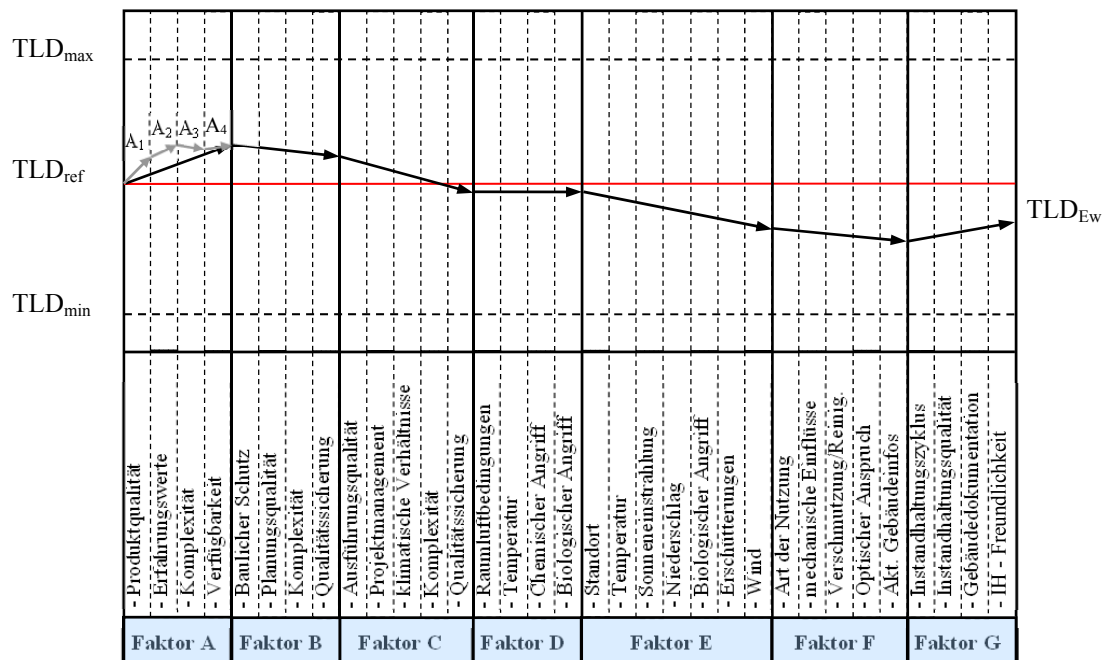


Abbildung 8-1: Modellvorschlag zur Berücksichtigung der Einflussgrößen

Abbildung 8-1 zeigt in der Übersicht das vorgeschlagene Berechnungsmodell. Die einzelnen Faktoren der DIN ISO 15686 werden in stochastisch unabhängige Subfaktoren unterteilt, für die eine Wichtung aus den Umfragen der Experten möglich war. Die abgefragten

Werte wurden den Klassen zugeteilt und die Faktorwerte ermittelt. Anschließend werden die maßgebenden Faktoren multipliziert, um von der Referenzlebensdauer auf die spezifische Lebensdauer schließen zu können. Somit beeinflusst jede Unterklasse durch ihren Wert den jeweiligen Faktor nach DIN ISO 15686, wobei einzelne Unterklassen oder ganze Faktoren, die auf das spezifische Bauteil keinen Einfluss haben, den Wert 1,0 erhalten. Können für einzelne Faktoren keine Aussagen getroffen werden, wird der Faktor ebenfalls mit 1,0 bewertet. Die genaue Entwicklung des Modells wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

8.2 Entwicklung des Einflussgrößenmodells

Im Rahmen der Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 wird die spezifische Lebensdauer eines Bauteils durch die Multiplikation der Referenzlebensdauer mit den vorhandenen Einflussfaktoren ermittelt. Diese Vorgehensweise wird, wie schon in der Einführung angedeutet, für das zu entwickelnde Modell beibehalten.

Neben der möglichst fachgerechten Bewertung aller Einflüsse besteht die Herausforderung für die Anwendung in der Praxis hauptsächlich darin, aus der großen Menge verschiedenartiger Parameter die maßgeblichen Einflussfaktoren herauszufiltern. Hierbei ist auf ein Gleichgewicht zwischen Ermittlungsaufwand und der damit erreichbaren Genauigkeit zu achten. Vor diesem Hintergrund wurden die Einflussfaktoren A-G nach DIN ISO 15686 in bewertbare Unterkategorien unterteilt und mit jeweils einem Szenario für positive, negative und neutrale Einflüsse belegt. In den folgenden Tabellen sind die verschiedenen Faktoren mit Untergruppen und entsprechenden Szenarien zusammengefasst. Diese Szenarien wurden, angelehnt an Maydl & Schuler (2010), frei definiert und dienen dem Anwender als Anhaltspunkt zur Abschätzung der Faktoren.

Tabelle 8-1: Subfaktoren und Bewertungsszenarien der Komponentenqualität (Faktor A) angelehnt an Maydl & Schuler (2010)

	MAX	DURCHSCHNITT	MIN
- Produktqualität	Verbesserung der Bauprodukteigenschaften (z. B. Korrosionsschutz durch chemische/physikalische Verfahren; Anstriche)	Für den Anwendungsfall brauchbares CE-gekennzeichnetes Bauprodukt mittlerer Preiskategorie	Noname-/Billigprodukt
- Erfahrungswerte	Langzeiterfahrung >20 Jahre	Langzeiterfahrung ca. 10 Jahre und Abschätzung mit Schnellalterungstests	Langzeiterfahrung <5 Jahre ohne Schnellalterungstests
- Komplexität	Einfach zu verarbeitendes Bauprodukt; etablierte Fertigungstechnik; hohe Kompatibilität mit anderen Modulen	Verarbeitung des Bauprodukts erfordert spezielle Ausbildung; mäßige Kompatibilität	Schwierig verarbeitbares Bauprodukt; nicht etablierte Fertigungstechnik; keine Kompatibilität
- Verfügbarkeit	Langfristige Verfügbarkeit des Bauprodukts gegeben	Zeitlich begrenzte Verfügbarkeit des Bauprodukts, aber substituierbar	Zeitlich begrenzte Verfügbarkeit des Bauprodukts und keine Substitution möglich (Sonderlösungen)

Für eine möglichst genaue Betrachtung der Einflüsse ist es möglich, alle 33 Subfaktoren getrennt zu bewerten und in das Modell einzurechnen. Im Rahmen dieser Arbeit und für die spätere Verwendung in der Praxis wird empfohlen, die jeweiligen Subfaktoren nur als Hilfestellung für eine Bewertung der 7 Einflussfaktoren nach DIN ISO 15686 zu verwenden, um den Ermittlungsaufwand bei der Lebensdauervorhersage zu verringern.

Die Komponentenqualität wird für das gewählte Modell in vier Subfaktoren unterteilt (siehe Tabelle 8-1). Es werden die Produktqualität, vorhandene Erfahrungswerte mit dem Produkt, die Komplexität des Bauteils und die langfristige Verfügbarkeit unterschieden. Die eigentliche Produktqualität kann dabei zwischen Billigprodukt und hochwertiger Markenkomponente mit zusätzlichen Schutzschichten eingeordnet werden. Als übliches Standardbauteil ist ein zugelassenes Bauprodukt mittlerer Preiskategorie vorgesehen. Je nach Erfahrungswerten mit dem jeweiligen Produkt kann die Einordnung zwischen Komponenten mit vorhandener Langzeiterfahrung und Bauteilen ohne Erfahrung durchgeführt werden. Die Unterscheidung der Bauteilkomplexität wird v. a. durch die Verarbeitbarkeit bestimmt. Während einfache Bauteile mit üblicherweise hoher Kompatibilität zu anderen Modulen auf eine längere Lebensdauer schließen lassen, müssen schwierige Bauteile mit hoher Komplexität häufig frühzeitig wegen fehlender Kompatibilität mit anderen Bauteilen ersetzt werden. Ähnliches gilt für die Verfügbarkeit von Bau- bzw. Ersatzteilen, die sich ebenfalls direkt auf die Lebensdauer einer Komponente auswirken kann.

Tabelle 8-2: Subfaktoren und Bewertungsszenarien der Entwurfsqualität (Faktor B) angelehnt an Maydl & Schulter (2010)

	MAX	DURCHSCHNITT	MIN
- Eingliederung in die Konstruktion	Standort- und funktionsgerechter Entwurf (hauptsächlich aktiver Korrosionsschutz, nur im Bedarfsfall passiv geschützt; gutes Kosten-Nutzenverhältnis bzgl. Schutzmaßnahmen); hohe Robustheit; gute Umnutzungsmöglichkeiten	Bedingt standort- und funktionsgerechter Entwurf (aktiver Korrosionsschutz teilweise durch passiven Korrosionsschutz ersetzt); mäßige Robustheit; Möglichkeit der Umnutzung bedingt gegeben	Kein standort- und funktionsgerechter Entwurf (geringer aktiver Korrosionsschutz; hauptsächlich passiver Korrosionsschutz); geringe Robustheit; Umnutzung kaum möglich
- Planungsqualität	Hohe finanzielle, wirtschaftliche und technische Leistungsfähigkeit des Planungsteams; Planung vor Baubeginn fristgerecht abgeschlossen	Mäßige finanzielle, wirtschaftliche und technische Leistungsfähigkeit des Planungsteams; Änderungen während Planung und/oder Ausführung; frühzeitige Kommunikation mit Ausführenden	Geringe finanzielle, wirtschaftliche und technische Leistungsfähigkeit des Planungsteams; Änderungen während Planung und/oder Ausführung ohne gezielte Kommunikation und Projektsteuerung
- Komplexität	Geringe Komplexität des Bauvorhabens in organisatorischer, planungstechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht	Mäßige Komplexität des Bauvorhabens in organisatorischer, planungstechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht	Hohe Komplexität des Bauvorhabens in organisatorischer, planungstechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht
- Qualitätssicherung	Planungsbegleitendes/ prozessorientiertes Qualitätsmanagement unter Einbeziehung unabhängiger Dritter (z. B. Gebäudezertifizierung)	Gewerorientiertes Qualitätsmanagement	Keine Qualitätssicherung bzw. kein Qualitätsmanagement

In Tabelle 8-2 wird die Entwurfsqualität analog zur Komponentenqualität ebenfalls in vier Subfaktoren unterteilt. Ein standort- und funktionsgerechter Entwurf unter Berücksichtigung der Eingliederung in die Konstruktion und guter Umnutzungsmöglichkeiten lässt sich als positives Szenario darstellen. Fehlender baulicher Schutz mit geringer Robustheit und schlechter Umnutzungsmöglichkeit wirkt sich dagegen negativ auf die Lebensdauer einer Komponente aus. Die Planungsqualität wird im Rahmen dieser Einteilung v. a. durch die Leistungsfähigkeit des Planungsteams gekennzeichnet. Wie bereits in Abschnitt 6.2.3 beschrieben, wird diese Leistungsfähigkeit häufig erst im Verlauf einer Planung deutlich. Der Umgang mit Änderungen sowie die fristgerechte Planung sind die wichtigsten Merkmale dieses Subfaktors. Die Komplexität des Gesamtbauvorhabens in planerischer Hinsicht hat auch auf die Lebensdauer einzelner Komponenten direkte Auswirkungen. Während bei hochkomplexen Bauvorhaben Bauteile häufig bis an ihren Grenzen belastet werden, sind Bauteile von wenig komplexen Bauvorhaben meist auch geringer belastet, so dass mit geringeren Auswirkungen auf die Lebensdauer zu rechnen ist. Die Qualitätssicherung in der Planung kann zwischen einem optimalen, planungsbegleitenden Qualitätsmanagement und einem nicht vorhandenen Qualitätsmanagement eingeordnet werden. Als durchschnittlicher Wert wird ein übliches, gewerkeorientiertes Qualitätsmanagement vorgesehen.

Tabelle 8-3: Subfaktoren und Bewertungsszenarien der Ausführungsqualität (Faktor C) angelehnt an Maydl & Schuler (2010)

	MAX	DURCHSCHNITT	MIN
- Ausführungsqualität	Hohe finanzielle, wirtschaftliche und technische Leistungsfähigkeit der Bauausführenden	Mäßige finanzielle, wirtschaftliche und technische Leistungsfähigkeit der Bauausführenden	Geringe finanzielle, wirtschaftliche und technische Leistungsfähigkeit der Bauausführenden
- Projektmanagement	Hohe Qualität des Projektmanagements; Qualitätsmanagement; Frühzeitiger Eingriff der Projektsteuerung bei Änderungen und ausreichende Kommunikation; Vorgabe von ausführungsorientierten Qualitätsstandards abgestimmt auf Bauherrenforderung	Mäßige Qualität des Projektmanagements; Auswirkungen von Änderungen lückenhaft dargestellt und kommuniziert	Geringe Qualität des Projektmanagements; Auswirkungen von Änderungen mangelhaft dargestellt und kommuniziert; Schnittstellenproblematik zwischen einzelnen Gewerken
- klimatische Verhältnisse auf der Baustelle	-	Nutzungstypische Umgebungsverhältnisse	Problematische Umgebungsverhältnisse (Hitze, Feuchte), die im Gegensatz zur späteren Nutzung stehen
- Komplexität	Geringe Komplexität des Bauvorhabens in organisatorischer, ausführungstechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht	Mäßige Komplexität des Bauvorhabens in organisatorischer, ausführungstechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht	Hohe Komplexität des Bauvorhabens in organisatorischer, ausführungstechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht
- Qualitätssicherung	Ausführungsbegleitendes Qualitätsmanagement unter Einbeziehung unabhängiger Dritter (z. B. Gebäudezertifizierung)	Gewerkeorientiertes Qualitätsmanagement	Keine Qualitätssicherung bzw. kein Qualitätsmanagement

Der Faktor Ausführungsqualität (siehe Tabelle 8-3) teilt sich in fünf Subfaktoren ein. Es werden die reine Ausführungsqualität, die Qualität des Projektmanagements, die Einbauverhältnisse, die Komplexität des Bauvorhabens und die Qualitätssicherung unterschieden. Die eigentliche Ausführungsqualität gliedert sich, ähnlich wie die Planungsqualität, anhand der Leistungsfähigkeit der beteiligten Firmen. Eine hohe wirtschaftliche und technische Leistungsfähigkeit der Baubeteiligten stellt eine gute Basis langer Bauteillebensdauern dar. Eine geringe Leistungsfähigkeit des ausführenden Unternehmens spiegelt sich häufig auch in der Qualität der abgelieferten Leistung wieder und führt zu einer Verkürzung der betroffenen Lebensdauern. Die Zusammenarbeit des Projektteams wird im Subfaktor Projektmanagement bewertet. Während schlechte Kommunikation und geringe Qualität des Projektmanagements häufig zu Problemen zwischen einzelnen Gewerken führen, kann eine hohe Qualität des Managements mit Vorgaben bezüglich der Ausführungsstandards durchaus eine Verlängerung der Lebensdauer von Bauteilen bewirken, wobei diese Subfaktoren eher als weiche Faktoren anzusehen sind, die nicht immer direkte Auswirkungen auf die Lebensdauer haben müssen. Die klimatischen Verhältnisse auf der Baustelle können nur neutrale bzw. negative Einflüsse auf die Lebensdauer von Bauteilen verursachen. Eine Verlängerung der Lebensdauer durch positive klimatische Verhältnisse während der Bauzeit ist nicht möglich. Die Komplexität des Gesamtbauvorhabens in ausführungstechnischer Hinsicht kann die Lebensdauer von Bauteilen noch deutlicher beeinflussen als die planerische Komplexität. Die Abstufung von geringer Komplexität, über mäßiger bis zu hoher Komplexität bleibt jedoch erhalten. Die entsprechenden Auswirkungen wurden bei der Quantifizierung der Faktoren berücksichtigt. Eine ausführungsbegleitende Qualitätssicherung kann unter Einbeziehung unabhängiger Experten zu einer Verlängerung der Lebensdauer von Bauteilen beitragen. Fehlendes Qualitätsmanagement führt im Regelfall zu geringerer Qualität und damit zu kürzeren Lebensdauern.

Tabelle 8-4: Subfaktoren und Bewertungsszenarien der Innenräumlichen Umgebungsbedingungen (Faktor D) angelehnt an Maydl & Schuler (2010)

	MAX	DURCHSCHNITT	MIN
- Raumluftbedingungen	Keine Taupunktunterschreitung (relative Luftfeuchtigkeit dauerhaft zwischen 50 und 60%); Simulationsberechnung; Entfeuchtung der Raumluft; mech. Lüftung	Unkritische Kondensatbildung (relative Luftfeuchtigkeit zwischen 60 bis 70% = lufttrocken; Abgabe des Kondensats in Wärmeperiode)	Kondensatgefährdete Konstruktion (Innendämmung; dampfdichte Außenschichten); kein Nachweis mittels Näherungs- oder Simulationsverfahren
- Temperatur	Konstant beheizte Räume	Regelmäßige Temperaturwechsel ($< \pm 10^{\circ}\text{C}$)	Unbeheizte Räume
- Chemischer Angriff	Keine chemischen Einwirkungen	Mäßige chemische Einwirkungen (z. B. Reduktion des Dissoziationsgrad von Säuren durch technische Maßnahmen)	Starke chemische Einwirkungen (z. B. Labor, intensive Reinigung, Schwimmbad, Treibstoffe, Öle)
- Biologischer Angriff	Keine biologischen Einwirkungen	Mäßige biologische Einwirkungen (z. B. Kleintiere, Insekten, Algen)	Starke biologische Einwirkungen (z. B. Algen, Flechten, Moose, Efeu, geringe UV/A-Strahlung \Rightarrow Schimmelbildung)

Die Umweltfaktoren D und E für innen- und außenräumliche Umgebungsbedingungen werden in vier (Tabelle 8-4) bzw. sieben (Tabelle 8-5) Subfaktoren untergliedert. Im Innenraum ist v. a. die Luftfeuchtigkeit als maßgebender Einflussfaktor zu nennen. Während sich eine geringe relative Luftfeuchtigkeit von unter 60% lebensdauerverlängernd auswirken kann, führt eine kondensatgefährdete Konstruktion häufig zu Schäden und damit zu einem vorzeitigen Ende der Lebensdauer. Die Innentemperatur führt nur in Ausnahmefällen zu einer Verlängerung oder Verkürzung der Lebensdauer. Üblicherweise ist mit regelmäßigen Temperaturwechseln im Bereich von $\pm 10^{\circ}\text{C}$ zu rechnen, die als Durchschnittswert ohne Auswirkung auf die Lebensdauer angesetzt werden. Chemische und Biologische Angriffe können sehr schnell zu einem frühzeitigen Ende der Lebensdauer führen. Eine Verlängerung aufgrund fehlender Einwirkungen ist nur für Bauteile möglich, die ursprünglich für einen Einsatz in leicht chemischem Milieu vorgesehen waren, und deren Schutzschichten zu einer Verlängerung der Lebensdauer führen können.

Im Außenbereich werden chemische Angriffe durch den jeweiligen Standort des Gebäudes definiert. Bauteile im ländlichen Bereich mit geringer Schadstoffbelastung können deutlich längere Lebensdauern erreichen als Bauteile im Stadtgebiet mit angrenzender Schwerverkehrsbelastung oder naheliegendem Industriegebiet. Die Außentemperatur, v. a. die Oberflächentemperatur von Außenbauteilen, kann extremen Schwankungen unterliegen und zu Schäden durch Risse im Bauteil führen. Dauerhafte, gemäßigte Temperaturen über 0°C mit geringen Schwankungen lösen üblicherweise keine Spannungen aus und können zu einer Verlängerung der Bauteillebensdauer beitragen. Der Einfluss der Sonneneinstrahlung wurde in Abschnitt 6.2.6.4 näher beschrieben. Je nach Ausrichtung der betroffenen Bauteile kann sich die Sonneneinstrahlung lebensdauerverlängernd oder lebensdauerverkürzend entsprechend der Himmelsrichtung auswirken. In Verbindung mit Frost, ist Feuchtigkeit ein häufiger Auslöser von Schäden und einem damit verbundenen vorzeitigen Austausch von Außenbauteilen. Die Feuchtigkeitseinwirkung auf Außenbauteile wird v. a. durch Niederschlag verursacht. Eingeteilt in verschiedene Beanspruchungsgruppen z. B. für Schlagregen nach DIN 4108-3 (2002) oder für Schneelast nach DIN 1055-5 (2005) können hohe Beanspruchungen zu einem stärkeren Eintrag von Feuchtigkeit und somit zu einer kürzeren Lebensdauer führen. Geringe Beanspruchungen aus Niederschlag oder geringe Bodenfeuchte bei erdberührten Bauteilen können durchaus eine Verlängerung der Lebensdauer bewirken. Einwirkungen aus biologischem Angriff werden üblicherweise nur subjektiv abgeschätzt. Das Auftreten von pflanzlichen und tierischen Schädlingen ist nur in den seltensten Fällen geplant und somit für die Lebensdauerprognose in der Planungsphase schwierig zu bewerten. Trotzdem wurden in Tabelle 8-5 drei Szenarien definiert, die zu einer Verkürzung bzw. Verlängerung der Lebensdauer führen können. Erschütterungen wirken sich je nach Erdbebenzone und entsprechender Lage des Gebäudes unterschiedlich stark auf die Lebensdauer von Bauteilen aus. Je ge-

ringer die Erschütterungen sind und je seltener mögliche Erschütterungen stattfinden, desto länger ist die Lebensdauer der betroffenen Bauteile. Ähnlich wie der Subfaktor Erschütterungen lässt sich der Wind nach DIN 1055-4 (2005) in verschiedene Lastzonen einteilen. Unter weiterer Berücksichtigung der Höhe über NN und einer eventuellen exponierten Lage lassen sich die Szenarien entsprechend ihrer Wirkung auf die Lebensdauer definieren.

Tabelle 8-5: Subfaktoren und Bewertungsszenarien der außenräumlichen Umweltbedingungen (Faktor E) angelehnt an Maydl & Schulter (2010)

	MAX	DURCHSCHNITT	MIN
- Standort	Ländlicher Bereich mit geringer Verkehrs- und Schadstoffbelastung	Stadtgebiet ohne angrenzender Schwerverkehrsbelastung; Industriegebiet mit hohen Umweltstandards; mäßige Schadstoffbelastung	Stadtgebiet mit angrenzender Schwerverkehrsbelastung; Industriegebiet; hohe Schadstoffbelastung
- Temperatureinwirkungen	Dauerhafte Temperaturen über 0°C; kein Frost	Gemäßigtes Klima mit geringen Frosttagen (<50/a)	Dauerhafte Temperaturen unter -10°C; häufige Frostwechsel (>100/a)
- Sonneneinstrahlung	Solare Einwirkung: lotrechte Bauteilfläche; Nordfassade	Solare Einwirkung: geneigte Bauteilfläche; Ost-, Südfassade	Solare Einwirkung: horizontale Bauteilfläche; Westfassade
- Feuchtigkeit / Niederschlag	Geringe Schlagregenbeanspruchung gemäß Beanspruchungsgruppe I nach DIN 4108-3; geringe Schneebelastung; keine Bodenfeuchte; keine Spritzwassergefährdung	Mittlere Schlagregenbeanspruchung gemäß Beanspruchungsgruppe II nach DIN 4108-3; mittlere Schneebelastung; erdangeschüttetes Bauteil; Spritzwasser begrenzt möglich	Starke Schlagregenbeanspruchung gemäß Beanspruchungsgruppe III nach DIN 4108-3; hohe Schnee-/Hagelbelastung möglich; Spritzwasserbereich von Verkehrsbauwerken
- Biologischer Angriff	Keine biologischen Einwirkungen; geringer Laubbefall	Mäßige biologische Einwirkungen (z. B. Kleintiere, Insekten, Algen bzw. mäßiger Laubbefall)	Starke biologische Einwirkungen (z. B. Algen, Flechten, Moose, Efeu, geringe UV/A-Strahlung => Schimmelbildung) und starker Laubbefall
- Erschütterungen	Außerhalb der Erdbebenzonen; kaum angrenzender Schwerverkehr	Erdbebenzone 0 nach DIN 4149; mäßiger angrenzender Schwerverkehr	Erdbebenzone 1 nach DIN 4149; starker angrenzender Schwerverkehr
- Wind	Windlastzone 1, Geländekategorie III-IV nach DIN 1055-4, geschützte Lage	Windlastzone 1 oder 2, Geländekategorie II-III nach DIN 1055-4, frei stehende Gebäude ohne besonderen Schutz	Windlastzone 2-4, Geländekategorie I-II nach DIN 1055-4, ungeschützte, exponierte Lage, Gebäudehöhe über 800m ü. NN

Die Gebrauchskonditionen lassen sich in fünf Subfaktoren einteilen (siehe Tabelle 8-6). Es werden die Art der Nutzung, mögliche mechanische Einflüsse, die Verschmutzungs- bzw. die Reinigungsintensität, der optische Anspruch und die verfügbaren Gebäudeinformationen unterschieden. Als wichtigster Subfaktor ist die Art der Nutzung zu nennen. Geringe Nutzungsintensitäten können zu einer deutlichen Verlängerung der Lebensdauer von Bauteilen führen, da diese nahezu keinen Verschleiß oder nur geringe Verschmutzung erfahren. Hohe Nutzungsintensitäten und dabei v. a. höhere Intensitäten als vorgesehen, bewirken eine deutliche Verkürzung der Lebensdauer betroffener Bauteile. Mechanische Einwirkungen sind häufig direkt mit der Art der Nutzung korreliert. Öffentlich zugängliche Bereiche, unter Umständen sogar mit Fahrzeugverkehr, beeinflussen die Le-

bensdauer betroffener Boden- oder Wandbeläge erheblich, während geschützte oder nicht zugängliche Bereiche keine negativen Einflüsse auf die Lebensdauer erwarten dürfen, was im Regelfall zu einer Verlängerung des Austauschzyklus führt. Die Verschmutzungs- und Reinigungsintensität lässt sich ebenfalls von gering, über mäßig, bis hoch und den entsprechenden Auswirkungen einteilen. Ein niedriger Verschmutzungsgrad mit fachgerechter Reinigung verursacht keine negativen Auswirkungen auf die Lebensdauer, während starke Verschmutzung mit häufiger oder unsachgemäßer Reinigung die Lebensdauer von Bauteilen verkürzen kann. Der optische Anspruch an ein Bauteil ist ein subjektiver Faktor, der v. a. bei vertraglich vereinbarten Eigenschaften von öffentlichen Flächen zum Tragen kommt. Während z. B. ein Wandbelag im Eingangsbereich einer Bank aufgrund des optischen Anspruchs frühzeitig ausgetauscht werden muss, könnte der gleiche Belag im privaten Bereich noch einige Jahre bestehen bleiben. Ähnliches gilt für Bodenbeläge, Deckenverkleidungen oder Fassaden. Als letzter Subfaktor der Gebrauchsbedingungen wird das Aufliegen eines Nutzerhandbuches genannt. Anhand eines aktualisierten Nutzerhandbuchs mit detaillierten Betriebs- und Pflegehinweisen kann die Nutzung von beschriebenen Bauteilen erheblich verlängert werden, während ein fehlendes Handbuch zu Schäden bei der Instandhaltung und einem frühzeitigen Ende der Lebensdauer führen kann.

Tabelle 8-6: *Subfaktoren und Bewertungsszenarien der Gebrauchsbedingungen (Faktor F) angelehnt an Maydl & Schuler (2010)*

	MAX	DURCHSCHNITT	MIN
- Art der Nutzung	Geringe Nutzungsintensität (z. B. Sitzungssaal mit geringer Raumbelastung)	Mäßige Nutzungsintensität (z. B. Großraumbüro mit Publikumsverkehr); Tagbetrieb	Hohe Nutzungsintensität (z. B. Eingangsbereiche, Schule, Krankenhaus); Tag-/Nachtbetrieb
- mechanische Einflüsse	Vor mechanischen Einwirkungen geschütztes Bauteil; nicht öffentlich zugänglich	Durch konstruktive Maßnahmen begrenzte mechanische Einwirkungen; nicht öffentlich zugänglicher Bereich	Gegen mechanische Einwirkungen ungeschütztes Bauteil; öffentlich zugänglich
- Verschmutzungs-/Reinigungsintensität	Geringer Verschmutzungsgrad; niedrige Reinigungsintensität; fachgerechte Reinigung	Mäßiger Verschmutzungsgrad; mittlere Reinigungsintensität; fachgerechte Reinigung	Hoher Verschmutzungsgrad; starke Reinigungsintensität; evtl. unsachgemäße Reinigung
- Optischer Anspruch	Private Nutzung	Gewerblich genutzte Gebäudeteile	Gewerblich genutzte Gebäudeteile mit hohen Komfortansprüchen
- Aktualisierte Gebäudeinformationen	Aktualisiertes Nutzerhandbuch bzgl. Gebäudeinformationen; detaillierte Betriebs- und Pflegeanleitungen für Haustechnik, etc.	Aufliegen eines praxisüblichen Nutzerhandbuchs ohne laufende Aktualisierung bzw. Adaptierung	Kein Nutzerhandbuch; keine Betriebs- und Pflegeanleitungen an den Nutzer weitergegeben

Das Instandhaltungsniveau nach Tabelle 8-7 ist der letzte Einflussfaktor des gewählten Modells. Er gliedert sich in Instandhaltungszyklus, Qualität der Instandhaltung, Gebäudedokumentation und Instandhaltungsfreundlichkeit. Der Subfaktor Instandhaltungszyklus beinhaltet sowohl den Zeitpunkt als auch die Häufigkeit der Instandhaltung. Beides wirkt sich direkt auf die Lebensdauer von Bauteilen aus. Die Qualität der durchgeführten In-

standhaltungsarbeiten ist ein weiterer wichtiger Punkt bei der Lebensdauerplanung. Während sich ein mäßiges oder gar fehlendes Bewirtschaftungskonzept mit mangelhafter Ausführung der Instandhaltung sehr negativ auf die Lebensdauer auswirken kann, führt ein detailliertes Instandhaltungskonzept mit exzellenter Durchführung der Arbeiten mit großer Sicherheit zu einer Verlängerung der Lebensdauer. Das Vorhalten einer Gebäudedokumentation ist meistens direkt an die Instandhaltungsqualität geknüpft. Eine detaillierte und aktualisierte Dokumentation kann jederzeit den aktuellen Zustand des Gebäudes wiedergeben und die Durchführung sinnvoller Instandhaltungsmaßnahmen erleichtern, während eine fehlende Dokumentation häufig zu falschen oder fehlerhaften Maßnahmen und somit zu einer Verkürzung der Lebensdauer einzelner Elemente führen kann. Unter Instandhaltungsfreundlichkeit ist die Zugänglichkeit und Trennbarkeit einzelner Bauteile zusammengefasst. Die vollständige Lösbarkeit eines Bauteils von angrenzenden Schichten führt sowohl bei dem betroffenen Bauteil selbst, als auch bei den angrenzenden Bauteilen zu einer Verlängerung der Lebensdauer durch eine ausreichende Zugänglichkeit. Nicht zugängliche oder nur bedingt zugängliche Bauteile können nicht gewartet werden und müssen teilweise aufgrund schlechter Lösbarkeit gemeinsam mit anderen Bauteilen ausgetauscht werden, obwohl ihre technische Lebensdauer noch nicht erreicht wurde.

Tabelle 8-7: Subfaktoren und Bewertungsszenarien des Instandhaltungsniveaus (Faktor G) angelehnt an Maydl & Schuster (2010)

	MAX	DURCHSCHNITT	MIN
- Instandhaltungszyklus	Regelmäßige, vorbeugende Instandhaltung; Eingriff bei geringem Schaden bzw. bei geringer Dringlichkeit	Zustandsorientierte Instandhaltung; Eingriff bei mäßigem Schaden bzw. mittlerer Dringlichkeit	Ausfallbehebung; Eingriff bei großen Schäden bzw. hoher Dringlichkeit
- Qualität der Instandhaltung	Detailliertes Reinigungs-, Instandhaltungs- und Rückbaukonzept aufliegend; FM-Anforderungen in Planung berücksichtigt	Praxisübliche Gebäudebewirtschaftung	Fehlende Gebäudebewirtschaftung und fehlendes Instandhaltungs- und Rückbaukonzept
- Gebäudedokumentation	Detaillierte, aktualisierte Gebäudedokumentation	Lückenhafte Gebäudedokumentation (Instandhaltungsmaßnahmen nicht dokumentiert)	Fehlende Gebäudedokumentation (keine Planunterlagen von Errichtung und Instandhaltung vorhanden)
- Instandhaltungsfreundlichkeit	Standardbauteil; Einzelelement frei zugänglich und vollständig von der darunterliegenden Schicht lösbar	Standardbauteil; Einzelelement mit geringem Aufwand zugänglich und ohne vollständige Zerstörung des angrenzenden Bauelements von diesem ablösbar	Einzelelement nur bedingt/nicht zugänglich; Bauelement nicht von angrenzendem Bauteil ablösbar

Parallel zur Erstellung der Bewertungsszenarien wurden die verschiedenen Einflussgrößen in den Expertenumfragen in Bezug auf ihre tatsächliche Auswirkung auf die Lebensdauer abgefragt, so dass aus der Bewertung des Einflusses (kein, gering, mittel, groß) über das arithmetische Mittel der jeweiligen Umfrageteilnehmer die minimalen und maximalen Faktorwerte je Bauteil berechnet werden konnten (siehe Abschnitt 8.3). Tabelle 8-8 zeigt die für die weitere Bearbeitung notwendige Umwandlung der Umfragewerte in einen Faktor f_{Eg} .

Tabelle 8-8: Ermittlung des Bedeutungsfaktors der Einflüsse f_{Eg} aus Umfrageergebnissen

Einfluss	kein	gering	mittel	groß
Umfragewert	0	X	XX	XXX
Faktor f_{Eg}	0,00	0,33	0,67	1,00

Wie bereits in Abschnitt 4.4 beschrieben, gibt die DIN ISO 15686 keine konkreten Werte für die einzelnen Einflussfaktoren vor. Der Nutzer hat diesbezüglich absolute Wahlfreiheit, so dass theoretisch Werte zwischen null und unendlich möglich sind. Beispielhaft in der DIN ISO 15686 zu finden, sind Werte zwischen 0,8 und 1,2, jedoch sind diese nicht verbindlich vorgeschrieben. Durch das vorgeschlagene Intervall wird den Faktoren eine sehr große Möglichkeit zur Einflussnahme eingeräumt. Vor allem hinsichtlich der lebensdauerverlängernden Faktoren scheint das empfohlene Intervall erheblich überbewertet. Daher werden in dem in dieser Arbeit zu entwickelnden Modell die spezifischen Grenzfaktoren $X_{Auspr.}$ (Ausprägungsfaktor des jeweiligen Einflusses) über die jeweiligen Bandbreiten zwischen der maximalen Lebensdauer und der Referenzlebensdauer bzw. der Referenzlebensdauer und der minimalen Lebensdauer bestimmt. Ausgehend von den Beispielwerten der DIN ISO 15686 unter Berücksichtigung der Expertenaussagen soll der maximal mögliche Einfluss eines einzelnen Faktors auf die Lebensdauer bei ca. 20% begrenzt sein ($b_1/5$ bzw. $b_2/10$), so dass sich die spezifischen Grenzfaktoren $X_{Auspr.,min}$ und $X_{Auspr.,max}$ mittels Lebensdauerbandbreite und mittlerem Einflussgrößen-Faktor f_{Eg} durch die Formeln (8.1) bis (8.4) berechnen lassen. Die unterschiedlichen Faktoren der Gleichungen (8.3) und (8.4) sollen eine Überbewertung der lebensdauerverlängernden Faktoren verhindern (vgl. auch Bahr (2010)). Während ein „worst-case“-Szenario in der Praxis durchaus realistisch sein kann, erscheint eine erhebliche Verlängerung der Lebensdauer eher unwahrscheinlich. Mit den Lebensdauerwerten TLD_{min} , TLD_{ref} und TLD_{max} aus Literaturrecherche und Datenerhebung ergeben sich die möglichen Bandbreiten und spezifischen Grenzfaktoren nach den folgenden Gleichungen:

$$b_1 = TLD_{ref} - TLD_{min} \quad (8.1)$$

$$b_2 = TLD_{max} - TLD_{ref} \quad (8.2)$$

$$X_{Auspr.,max} = \frac{\left(TLD_{ref} + f_{Eg} \cdot \frac{b_2}{10} \right)}{TLD_{ref}} \quad (8.3)$$

$$X_{Auspr.,min} = \frac{\left(TLD_{ref} - f_{Eg} \cdot \frac{b_1}{5} \right)}{TLD_{ref}} \quad (8.4)$$

Somit lässt sich unter Berücksichtigung der Grenzfaktoren nach den Gleichungen (8.3) und (8.4) die spezifische Lebensdauer eines Bauteils in einem konkreten Umfeld (TLD_{Ew}) über die folgende Formel bestimmen:

$$TLD_{Ew} = TLD_{ref} \cdot \prod_{i=A}^G X_{Auspr.,i} \quad (8.5)$$

Unbekannte Faktoren bzw. Faktoren, die nicht in die Bewertung mit eingehen sollen, können dabei als Wahrscheinlichkeitsverteilungen zwischen den ermittelten Grenzfaktoren simuliert werden, auf die in Abschnitt 8.5 näher eingegangen wird.

8.3 Ergebnisse in den einzelnen Bauteilgruppen

Die Datenerhebung in Bezug auf die Einflussgrößen erfolgte auf Bauteilgruppenebene, so dass die abgefragten Einflussfaktoren nicht zusätzlich innerhalb der Fragebögen variiert werden mussten. Problematische Bauteilgruppen mit Bauteilen aus unterschiedlichen Materialien bzw. mit zum Teil sehr unterschiedlichen und nur schwer vergleichbaren Bauelementen wurden im Einzelfall auf Plausibilität überprüft und anschließend mit dem jeweils größten angegebenen Einfluss in die Bewertung aufgenommen. Somit kann es in einzelnen Bereichen zu einer Überbewertung bestimmter Einflüsse kommen, die aber durch eine kritische Bewertung im Rahmen der Anwendung wieder ausgeglichen werden kann.

In der folgenden Tabelle 8-9, aufgeteilt in die einzelnen Produktgruppen, werden die aus den Umfrageergebnissen umgerechneten und bereits upgedateten Einflussgrößenfaktoren f_{Eg} dargestellt, um einen Überblick über die Auswirkungen der Einflussgrößen bzw. deren Unterkategorien zu bekommen. Wie in Tabelle 8-8 aufgeführt, ist der Einfluss umso größer, je größer der dargestellte Faktor ist. Faktoren nahe null haben keinen Einfluss, Faktoren mit Werten von annähernd 1 haben einen sehr großen Einfluss auf die Lebensdauer eines Bauteils.

Tabelle 8-9 a und b: Einflussgrößenfaktor f_{Eg} der einzelnen Bauteilgruppen aus Umfragen

a) f_{Eg} für Fenster, Türen, Außenwandbekleidung, Sonnenschutz und Innenwandbekleidung

Einflussgrößenfaktor f_{Eg}		Fenster	Türen	AW-Bekleidung	Sonnenschutz	IW-Bekleidung
A	- Produktqualität	0,71	0,75	0,75	0,72	0,64
	- Erfahrungswerte	0,22	0,13	0,38	0,24	0,22
	- Komplexität	0,46	0,13	0,52	0,43	0,41
	- Nachhaltigkeit	0,47	0,23	0,49	0,30	0,20
B	- Eingliederung in Konstruktion	0,42	0,73	0,65	0,59	0,59
	- Planungsqualität	0,24	0,10	0,62	0,09	0,09
	- Komplexität	0,36	0,10	0,48	0,20	0,20
	- Qualitätssicherung	0,28	0,19	0,45	0,22	0,09
C	- Ausführungsqualität	0,74	0,71	0,81	0,63	0,65
	- Projektmanagement	0,35	0,21	0,42	0,28	0,26
	- Klimaverhältnisse auf der Baustelle	0,46	0,52	0,59	0,46	0,47
	- Komplexität	0,50	0,19	0,52	0,35	0,26
	- Qualitätssicherung	0,45	0,25	0,59	0,57	0,40

8 Vorhersage objektspezifischer Lebensdauern

Einflussgrößenfaktor f_{Eg}		Fenster	Türen	AW-Bekleidung	Sonnenschutz	IW-Bekleidung
D	- Raumlufthbedingungen	0,58	0,50	-	0,20	0,73
	- Temperatur	0,23	0,23	-	0,17	0,29
	- Chemischer Angriff	0,50	0,38	-	0,26	0,47
	- Biologischer Angriff	0,53	0,33	-	0,15	0,22
E	- Standort	0,60	0,46	0,65	0,52	-
	- Temperaturwechsel	0,54	0,54	0,67	0,41	-
	- Sonneneinstrahlung	0,90	0,85	0,83	0,38	0,37
	- Feuchtigkeit	0,58	0,52	0,83	0,26	-
	- Biologischer Angriff	0,53	0,33	0,74	0,15	-
	- Erschütterungen	0,38	0,25	0,54	0,08	0,31
	- Wind	0,32	0,31	0,48	0,71	-
F	- Art der Nutzung	0,53	0,75	0,59	0,30	0,65
	- mechanische Einflüsse	0,76	0,77	0,54	0,74	0,80
	- Verschmutzung / Reinigung	0,46	0,58	0,56	0,54	0,51
	- Optischer Anspruch	0,49	0,42	0,62	0,43	0,74
	- Aktual. Gebäudeinformationen	0,23	0,15	0,09	0,39	0,12
G	- Instandhaltungszyklus	0,76	0,88	0,70	0,91	0,64
	- Qualität der Instandhaltung	0,56	0,65	0,54	0,83	0,49
	- Gebäudedokumentation	0,24	0,17	0,15	0,39	0,10
	- Instandhaltungsfreundlichkeit	0,33	0,23	0,41	0,44	0,50

b) f_{Eg} für Böden, Deckenbekleidung, Dachfenster, Dachbeläge und Dachentwässerung

Einflussgrößenfaktor f_{Eg}		Böden	Deckenbechl.	Dachfenster	Dachbeläge	Dachentw.
A	- Produktqualität	0,82	0,63	0,87	0,69	0,61
	- Erfahrungswerte	0,58	0,30	0,36	0,34	0,33
	- Komplexität	0,27	0,36	0,21	0,62	0,62
	- Nachhaltigkeit	0,57	0,44	0,18	0,54	0,31
B	- Eingliederung in Konstruktion	0,70	0,61	0,54	0,80	0,70
	- Planungsqualität	0,36	0,39	0,24	0,68	0,59
	- Komplexität	0,21	0,44	0,18	0,61	0,40
	- Qualitätssicherung	0,19	0,31	0,10	0,60	0,32
C	- Ausführungsqualität	0,76	0,74	0,75	0,97	0,88
	- Projektmanagement	0,37	0,51	0,23	0,47	0,42
	- Klimaverhältnisse auf der Baustelle	0,50	0,50	0,49	0,57	0,54
	- Komplexität	0,33	0,33	0,20	0,63	0,28
D	- Qualitätssicherung	0,44	0,42	0,51	0,64	0,42
	- Raumlufthbedingungen	0,54	0,73	0,75	-	-
	- Temperatur	0,32	0,30	0,42	-	-
	- Chemischer Angriff	0,51	0,51	0,29	-	-
E	- Biologischer Angriff	0,19	0,18	0,51	-	-
	- Standort	-	-	0,57	0,49	0,63
	- Temperaturwechsel	-	-	0,66	0,67	0,70
	- Sonneneinstrahlung	0,42	0,44	0,73	0,84	0,57
F	- Feuchtigkeit	-	-	0,80	0,59	0,56
	- Biologischer Angriff	-	-	0,69	0,49	0,66
	- Erschütterungen	0,29	0,31	0,14	0,23	0,30
	- Wind	-	-	0,29	0,29	0,18
G	- Art der Nutzung	0,83	0,57	0,74	0,39	0,49
	- mechanische Einflüsse	0,71	0,71	0,78	0,74	0,62
	- Verschmutzung / Reinigung	0,82	0,49	0,43	0,33	0,69
	- Optischer Anspruch	0,74	0,69	0,32	0,28	0,24
H	- Aktual. Gebäudeinformationen	0,61	0,16	0,20	0,16	0,09
	- Instandhaltungszyklus	0,84	0,42	0,75	0,91	0,77
	- Qualität der Instandhaltung	0,81	0,28	0,67	0,84	0,62
	- Gebäudedokumentation	0,65	0,11	0,25	0,20	0,17
I	- Instandhaltungsfreundlichkeit	0,44	0,27	0,27	0,61	0,54

Da eine Bewertung von 33 Einflussgrößen in 7 Einflussgrößenklassen je Bauteil für die Anwendung in der Praxis zu umfangreich und aufwendig ist, werden die Maximalwerte innerhalb der jeweiligen Bauteilgruppe als Einflussgrößenwert für die entsprechende

Klasse verwendet. Nur durch die Verwendung des jeweiligen Maximalwertes kann sichergestellt werden, dass der entsprechende Einfluss aus den Expertenumfragen vollständig berücksichtigt wird. So würde beispielsweise ein Maximalwert der Sonneneinstrahlung bei Dachbelägen von $f_{Eg} = 0,84$ durch die Bildung des Mittelwertes über die Faktorklasse „Außenräumliche Umgebungsbedingungen“ auf einen möglichen Einflussgrößenfaktor $f_{Eg} = 0,51$ reduziert und der mögliche Einfluss der Sonneneinstrahlung auf Dachbeläge abgeschwächt. Für die einzelnen Gruppen ergeben sich somit die folgenden maximalen Einflussgrößenfaktoren:

Tabelle 8-10: Maßgebende Einflussgrößenfaktoren f_{Eg} für die weitere Berechnung

Einflussgrößenfaktor f_{Eg}	A	B	C	D	E	F	G
Fenster	0,71	0,42	0,74	0,58	0,90	0,76	0,76
Türen	0,75	0,73	0,71	0,50	0,85	0,77	0,88
AW-Bekleidungen	0,75	0,65	0,81	-	0,83	0,62	0,70
Sonnenschutz	0,72	0,59	0,63	0,26	0,71	0,74	0,91
IW-Bekleidungen	0,64	0,59	0,65	0,73	0,37	0,80	0,64
Böden	0,82	0,70	0,76	0,54	0,42	0,83	0,84
Deckenbekleidungen	0,63	0,61	0,74	0,73	0,44	0,71	0,42
Dachfenster	0,87	0,54	0,75	0,75	0,80	0,78	0,75
Dachbeläge	0,69	0,80	0,97	-	0,84	0,74	0,91
Dachentwässerung	0,62	0,69	0,88	-	0,70	0,69	0,77

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Bauteilgruppen lassen sich durch eine bildliche Darstellung besser erkennen. In der folgenden Abbildung 8-2 sind die einzelnen Faktorkategorien mit ihren jeweiligen Einflüssen auf die Bauteilgruppen dargestellt.

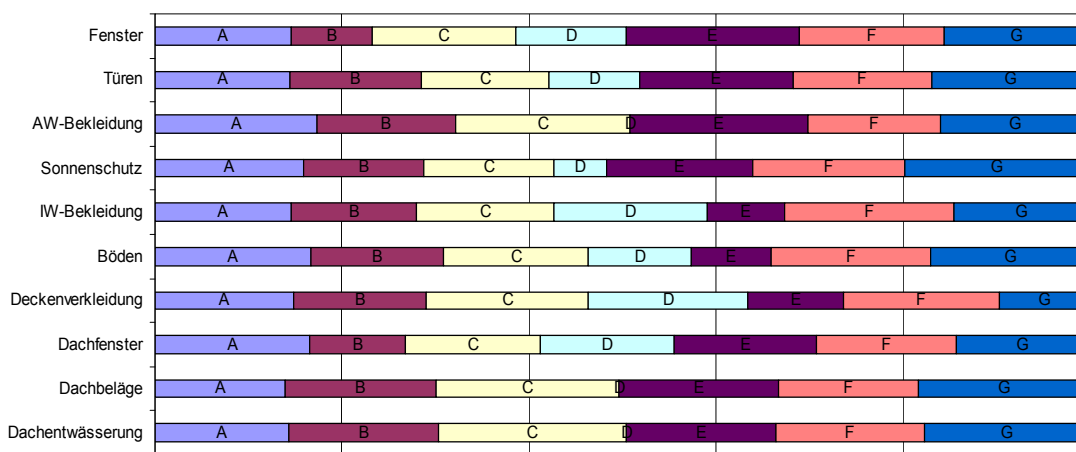


Abbildung 8-2: Einfluss der einzelnen Faktorkategorien auf die jeweiligen Bauteilgruppen

Die eigentliche Bewertung der Einflussgrößen obliegt dem Anwender, der sich bei seiner Auswahl an den Szenarien nach Tabelle 8-1 bis Tabelle 8-7 orientieren kann. Nach Gleichung (8.5) ergibt sich die objektspezifische Lebensdauer unter Berücksichtigung der Einflussgrößen.

8.4 Darstellung maßgebender Bauteile in vereinfachter Übersicht

Im Folgenden werden für jede Bauteilgruppe die gebräuchlichsten Bauteile mit ihren Ergebniswerten kurz dargestellt. Neben dem Referenzwert der mittleren technischen Lebensdauer TLD_{ref} , sind die minimale und maximale technische Lebensdauer sowie die Grenzfaktoren der Einflussgrößen angegeben. In Verbindung mit Gleichung (8.5) kann über die minimalen und maximalen Faktoren der Einflussgrößen A bis G nach DIN ISO 15686 die jeweilige spezifische Objektlebensdauer berechnet werden. Auf die Einbeziehung der Verteilungsfunktionen der einzelnen Einflüsse wird in dieser vereinfachten Darstellung ebenso verzichtet, wie auf die Darstellung eines Vertrauensbereichs oder Fraktilwerten.

Bauteilgruppe Fenster:

Tabelle 8-11: Technische Lebensdauer mit Einflussgrenzwerten von Fenstern

Bauteil	Technische Lebensdauer [a]			A	B	C	D	E	F	G
	TLD_{min}	TLD_{ref}	TLD_{max}	max min	max min	max min	max min	max min	max min	max min
Alufenster	10	47	119	1,13 0,84	1,09 0,88	1,15 0,79	1,06 0,84	1,25 0,69	1,18 0,79	1,14 0,83
Holzfenster	3	36	88	1,13 0,76	1,09 0,82	1,14 0,69	1,05 0,76	1,24 0,56	1,18 0,69	1,13 0,75
Kunststofffenster	3	38	83	1,11 0,75	1,08 0,82	1,12 0,68	1,05 0,76	1,21 0,55	1,15 0,68	1,11 0,75

Bauteilgruppe Außentüren:

Tabelle 8-12: Technische Lebensdauer mit Einflussgrenzwerten von Außentüren

Bauteil	Technische Lebensdauer [a]			A	B	C	D	E	F	G
	TLD_{min}	TLD_{ref}	TLD_{max}	max min	max min	max min	max min	max min	max min	max min
Alutür	7	47	107	1,09 0,84	1,08 0,85	1,10 0,77	1,05 0,82	1,22 0,63	1,20 0,68	1,14 0,76
Vollholztür	8	44	88	1,07 0,86	1,07 0,87	1,08 0,79	1,04 0,84	1,19 0,67	1,17 0,72	1,12 0,79
Glasrahmentür	9	48	104	1,08 0,86	1,08 0,87	1,09 0,80	1,05 0,84	1,21 0,67	1,19 0,72	1,13 0,79

8.4 Darstellung maßgebender Bauteile in vereinfachter Übersicht

Bauteilgruppe Außenwandbekleidung:

Tabelle 8-13: Technische Lebensdauer mit Einflussgrenzwerten von Außenwandbekleidungen

Bauteil	Technische Lebensdauer [a]			A	B	C	D	E	F	G
	TLD _{min}	TLD _{ref}	TLD _{max}	max min	max min	max min	max min	max min	max min	max min
WDVS	7	51	120	1,13 0,76	1,14 0,76	1,14 0,69	- -	1,26 0,55	1,15 0,74	1,11 0,80
2-schalige MW-Konstruktion	7	52	195	1,21 0,76	1,22 0,75	1,23 0,69	- -	1,42 0,54	1,24 0,74	1,17 0,80
Pfosten-Riegel-Fassade	5	40	84	1,11 0,76	1,12 0,75	1,12 0,68	- -	1,22 0,54	1,13 0,73	1,09 0,79

Bauteilgruppe Sonnenschutz:

Tabelle 8-14: Technische Lebensdauer mit Einflussgrenzwerten von Sonnenschutzelementen

Bauteil	Technische Lebensdauer [a]			A	B	C	D	E	F	G
	TLD _{min}	TLD _{ref}	TLD _{max}	max min	max min	max min	max min	max min	max min	max min
Kunststoffroll-laden	3	23	57	1,13 0,76	1,09 0,84	1,14 0,69	1,03 0,88	1,19 0,76	1,19 0,68	1,21 0,65
Aluminium-jalousien	5	30	68	1,12 0,79	1,08 0,86	1,13 0,73	1,02 0,90	1,17 0,71	1,17 0,72	1,18 0,70
Stoffsonnenstore	2	13	39	1,16 0,81	1,11 0,87	1,18 0,75	1,03 0,91	1,24 0,73	1,24 0,74	1,26 0,72

Bauteilgruppe Innenwandbekleidung:

Tabelle 8-15: Technische Lebensdauer mit Einflussgrenzwerten von Innenwandbekleidung

Bauteil	Technische Lebensdauer [a]			A	B	C	D	E	F	G
	TLD _{min}	TLD _{ref}	TLD _{max}	max min	max min	max min	max min	max min	max min	max min
Gipskarton-wandbauplatten	10	50	104	1,12 0,81	1,08 0,87	1,13 0,74	1,08 0,78	- -	1,24 0,66	1,14 0,78
Fliesen	10	50	125	1,15 0,81	1,10 0,87	1,16 0,74	1,10 0,78	- -	1,31 0,66	1,18 0,78
Tapete	3	13	33	1,15 0,81	1,10 0,87	1,17 0,75	1,10 0,79	- -	1,31 0,67	1,18 0,78

Bauteilgruppe Böden:

Tabelle 8-16: Technische Lebensdauer mit Einflussgrenzwerten von Bodenbelägen

Bauteil	Technische Lebensdauer [a]			A	B	C	D	E	F	G
	TLD _{min}	TLD _{ref}	TLD _{max}	max min	max min	max min	max min	max min	max min	max min
Fliesen	6	51	136	1,18 0,72	1,12 0,81	1,15 0,70	1,08 0,80	- -	1,32 0,58	1,23 0,66
Textiler Boden-belag	2	11	29	1,18 0,77	1,12 0,85	1,16 0,76	1,07 0,84	- -	1,32 0,65	1,23 0,73
Linoleum	3	21	63	1,21 0,71	1,13 0,81	1,18 0,70	1,08 0,79	- -	1,37 0,57	1,26 0,66

8 Vorhersage objektspezifischer Lebensdauern

Bauteilgruppe Deckenbekleidungen:

Tabelle 8-17: Technische Lebensdauer mit Einflussgrenzwerten von Deckenbekleidung

Bauteil	Technische Lebensdauer [a]			A	B	C	D	E	F	G
	TLD _{min}	TLD _{ref}	TLD _{max}	max min	max min	max min	max min	max min	max min	max min
Putz	10	46	149	1,22 0,80	1,22 0,80	1,26 0,72	1,13 0,80	- -	1,35 0,71	1,13 0,87
Holzbekleidung	10	58	119	1,13 0,77	1,13 0,76	1,15 0,68	1,08 0,77	- -	1,20 0,67	1,08 0,85
Metallbekleidung	12	50	137	1,19 0,81	1,19 0,81	1,22 0,73	1,11 0,81	- -	1,29 0,72	1,11 0,88

Bauteilgruppe Dachfenster:

Tabelle 8-18: Technische Lebensdauer mit Einflussgrenzwerten von Dachfenstern

Bauteil	Technische Lebensdauer [a]			A	B	C	D	E	F	G
	TLD _{min}	TLD _{ref}	TLD _{max}	max min	max min	max min	max min	max min	max min	max min
Dachluke Stahl	8	42	133	1,15 0,84	1,10 0,89	1,16 0,79	1,11 0,81	1,32 0,66	1,24 0,77	1,19 0,81
Dachflächenfenster Holz	6	34	51	1,05 0,83	1,03 0,89	1,04 0,80	1,04 0,80	1,11 0,64	1,08 0,75	1,06 0,80
Dachfl.-fenster Kunststoff	9	37	79	1,10 0,86	1,07 0,91	1,07 0,83	1,07 0,83	1,21 0,69	1,16 0,79	1,13 0,83

Bauteilgruppe Dachbeläge:

Tabelle 8-19: Technische Lebensdauer mit Einflussgrenzwerten von Dachbelägen

Bauteil	Technische Lebensdauer [a]			A	B	C	D	E	F	G
	TLD _{min}	TLD _{ref}	TLD _{max}	max min	max min	max min	max min	max min	max min	max min
Dachziegel	6	52	199	1,21 0,76	1,27 0,71	1,27 0,65	- -	1,32 0,63	1,19 0,78	1,25 0,72
Betondachsteine	7	45	139	1,18 0,78	1,22 0,73	1,22 0,68	- -	1,26 0,66	1,15 0,80	1,21 0,74
Bitumenbahnen	6	27	91	1,19 0,82	1,24 0,78	1,24 0,74	- -	1,28 0,72	1,17 0,84	1,23 0,79
Kunststoffbahnen	8	29	86	1,17 0,84	1,21 0,81	1,22 0,77	- -	1,25 0,75	1,15 0,86	1,20 0,81

Bauteilgruppe Dachentwässerung:

Tabelle 8-20: Technische Lebensdauer mit Einflussgrenzwerten von Dachentwässerungselementen

Bauteil	Technische Lebensdauer [a]			A	B	C	D	E	F	G
	TLD _{min}	TLD _{ref}	TLD _{max}	max min	max min	max min	max min	max min	max min	max min
Dachrinne Kupfer	10	65	190	1,17 0,79	1,18 0,77	1,18 0,72	- -	1,27 0,63	1,19 0,76	1,19 0,76
Regenfallrohr Kunststoff	3	17	43	1,14 0,81	1,16 0,80	1,15 0,75	- -	1,23 0,67	1,16 0,79	1,16 0,79
Dachablauf Aluminium	6	40	257	1,31 0,78	1,33 0,77	1,33 0,72	- -	1,52 0,63	1,35 0,76	1,35 0,76

8.5 Erweiterung des Modells durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Sämtliche Einflussgrößen, auch wenn sie wissenschaftlich genau definiert werden können, unterliegen gewissen Unsicherheiten. Vor allem zum Zeitpunkt der Planung eines Gebäudes kann nur in den wenigsten Fällen abgeschätzt werden, welche Einflüsse im Laufe der Nutzungszeit auftreten und mit welchen Auswirkungen auf die einzelnen Bauteile gerechnet werden muss. Deshalb werden die bis dato unbekannten Einflussfaktoren als Zufallsgröße mit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilung abgebildet. Mit den minimalen und maximalen Ausprägungsfaktoren nach Gleichung (8.3) und (8.4) werden die einzelnen Einflüsse unter Berücksichtigung des Einflussgrößenfaktors f_{Eg} (siehe Tabelle 8-9) modelliert. Nachfolgende Abbildung 8-3 zeigt beispielhaft die Verteilung einer Einflussgröße um den Referenzwert 1,0 (= $X_{50\%}$) unter Berücksichtigung der Min- und Max-Werte als 5%- und 95%-Fraktilwerte:

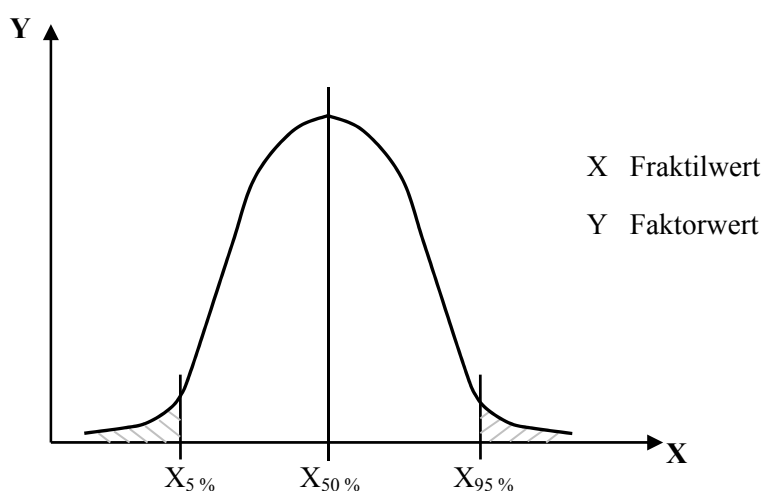
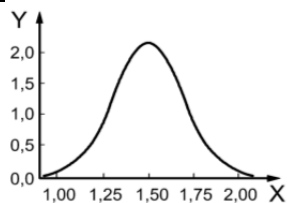
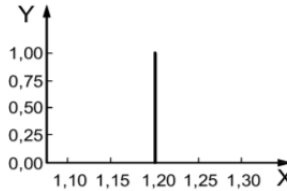
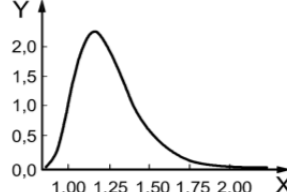
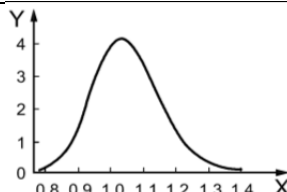
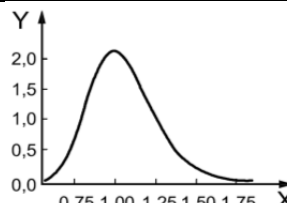
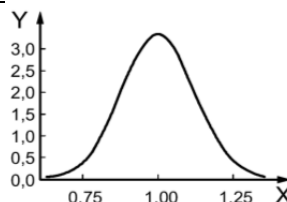
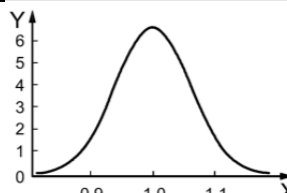


Abbildung 8-3: Statistische Verteilung eines beispielhaften Faktors X

DIN ISO 15686-8 (2008) versucht anhand eines Beispiels die Möglichkeiten der statistischen Verteilungen in Verbindung mit der Faktorenmethode aufzuzeigen (siehe auch Moser (1999)). In diesem Beispiel wird der Verteilungstyp für die einzelnen Faktoren anhand von Expertenbefragungen bestimmt. Folgende Verteilungstypen werden vorgeschlagen:

Tabelle 8-21: Verteilungstypen der verschiedenen Einflusskategorien nach DIN ISO 15686-8 (2008)

Faktor	Kategorie	Verteilungstyp	Beispiel
A	Komponentenqualität	Normalverteilung	
B	Entwurfsqualität	deterministisch	
C	Ausführungsqualität	Gumbelverteilung	
D	Innenräumliche Bedingungen	Lognormalverteilung	
E	Außenräumliche Bedingungen	Lognormalverteilung	
F	Gebrauchskonditionen	Normalverteilung	
G	Instandhaltungsniveau	Normalverteilung	

Die Bewertung des Faktors B – Entwurfsqualität in der DIN ISO 15686-8 erfolgt deterministisch. Für einen Vergleich der gezeigten Verteilungen nach DIN ISO 15686 mit anderen Verteilungstypen wird der Faktor Entwurfsqualität als Normalverteilung modelliert. Am Beispiel des Standardbauteils Holzfenster werden die verschiedenen Einflussfaktoren A bis G als symmetrische Verteilungen um den Mittelwert (1,0) mit der Grenze $X_{Auspr.,min}$ als 5%- bzw. 95%-Fraktilwerte simuliert. Anhand der Gleichung (8.5) werden die Verteilungen nach DIN ISO 15686-8 den Faktoren als Normalverteilung, Lognormalverteilung und einfache Dreiecksverteilung gegenübergestellt. Durch die verschiedenen Verteilungstypen ergeben sich unterschiedliche Mittelwerte und Standardabweichungen (siehe Abbildung 8-4).

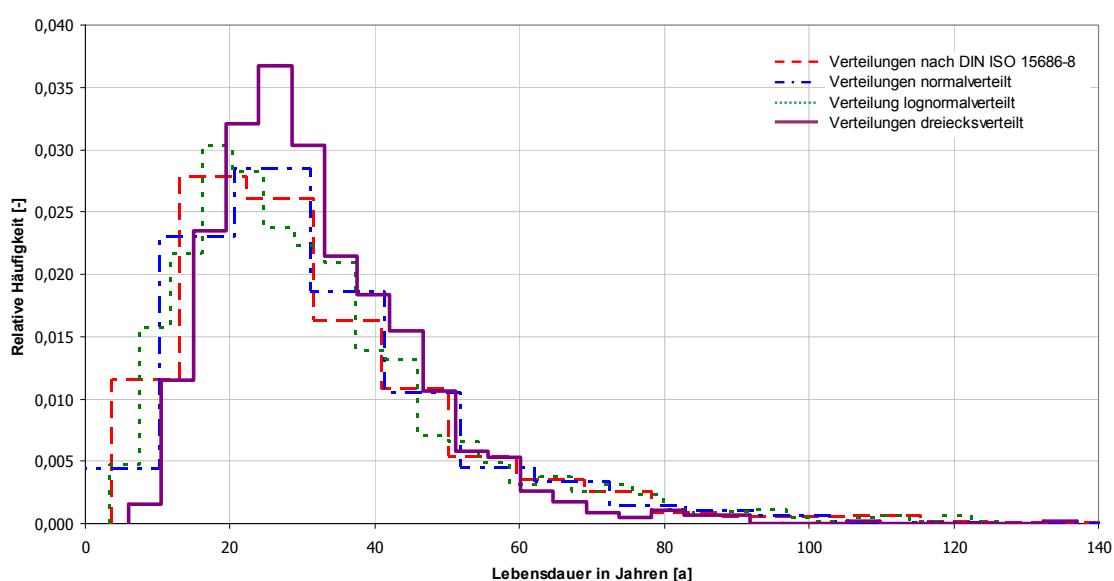


Abbildung 8-4: Überlagerung der verschiedenen Verteilungstypen am Beispiel Holzfenster

Ausgehend vom Referenzwert der Lebensdauer von 35,9 Jahren sind die Mittelwerte mit entsprechenden Standardabweichungen in der folgenden Tabelle 8-22 dargestellt. Die Differenz der einzelnen Mittelwerte zum Referenzwert (35,9 Jahre) entsteht aus den Faktoren D und E, deren Mittelwert geringfügig von 1,0 abweicht. Die Werte wurden mittels Monte-Carlo Simulation berechnet. Die Simulationsanzahl betrug 100 bei einer Iterationsanzahl von jeweils 1000.

Tabelle 8-22: Vergleich möglicher Verteilungstypen zur Beschreibung der Einflusskategorien am Beispiel Holzfenster

	Verteilungen nach DIN ISO 15686-8	Alle Faktoren normalverteilt	Alle Faktoren lognormalverteilt	Alle Faktoren dreiecksverteilt
Mittelwert	32,2	32,0	32,0	32,1
Standardabweichung	21,3	19,4	19,6	14,2

Allgemeingültige Fehlerbetrachtungen von Schiroslawski (1982) sagen aus, dass bei falscher Wahl des Funktionstyps z. B. zwischen Weibull- und Normalverteilung bzw. zwischen Weibull- und Lognormalverteilung Ergebnisfehler von 3 - 5% auftreten. Auf Basis der Aussagen von Steinecke (1979) (siehe auch Kapitel 2.5.2) und des Verteilungsvergleichs am Beispiel Holzfenster werden die unbekannten Einflussgrößen im weiteren Verlauf dieser Arbeit vereinfacht als Dreiecksverteilungen mit den entsprechenden Min- und Max-Werten aus den Gleichungen (8.3) und (8.4) um den Wert 1,0 modelliert.

Mit dem entwickelten Verfahren kann somit bereits in der Planungsphase die voraussichtliche Lebensdauer von Bauteilen ermittelt werden. Auf Basis der Referenzlebensdauern aus Literatur und Expertenbefragungen lässt sich anhand einer qualitativen Bewertung von sieben Einflusskategorien die spezifische Lebensdauer je nach Kenntnis der Umgebungsbedingungen mit entsprechender Eintrittswahrscheinlichkeit vorhersagen. Die qualitative Bewertung erfolgt in fünf Stufen nach Tabelle 8-23.

Tabelle 8-23: Anwendungsbezogene Bewertung der Einflussgrößen

Eingabe	Bewertung	Umsetzung
--	Nachweislich sehr schlechte Randbedingungen	Minimalwert $X_{Auspr.,min}$
-	Voraussichtlich schlechte oder mäßige Randbedingungen	Verteilung von $X_{Auspr.,min}$ bis Referenzwert 1,0
Ø	Normale Randbedingungen (Standardfall)	Referenzwert 1,0
+	Voraussichtlich gute Randbedingungen	Verteilung von Referenzwert 1,0 bis $X_{Auspr.,max}$
++	Nachweislich sehr gute Randbedingungen	Maximalwert $X_{Auspr.,max}$
k. A.	Keine Aussage möglich	Verteilung von $X_{Auspr.,min}$ bis $X_{Auspr.,max}$

Aufgrund der sehr aufwendigen Bewertung aller Einflussgrößen je Bauteil erfolgt in einem ergänzenden Arbeitsschritt eine Auswertung aller betrachteten Bauteile auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Basis unter Einbeziehung der definierten Verteilungen. Damit können für die untersuchten Bauteile der gesamten Bauteilliste sowohl der Mittelwert der technischen Lebensdauer als auch die 5%- und 95%-Fraktilwerte angegeben werden (siehe Anhang H). Weitere Vertrauensbereiche mit anderen Wahrscheinlichkeiten (z.B. 70% oder 80%) können bei Bedarf durch weitere Rechenläufe mit dem entwickelten Modell berechnet werden. Die auf stochastischer Basis ermittelten Mittelwerte bilden gleichzeitig eine neue Datenbasis für alle weiteren Betrachtungen im Bereich der Lebenszyklusanalyse. Den im Anhang H dargestellten Ergebnissen liegt eine Berechnung mit jeweils 1000 Iterationen bei 100 Simulationen zugrunde.

8.6 Modellverifikation in der Praxis

8.6.1 Allgemeines

Der realitätsnahe Abgleich des entwickelten Modells wurde anhand einer Befragung von langjährigen Objektleitern konkreter PPP-Projekte durchgeführt. Diese wurden zu ihren Erfahrungen bezüglich der Lebensdauer einzelner Bauteile unter konkreten Randbedingungen befragt (Graubner & Ritter (2010b)).

Die betrachteten Objekte aus dem Bereich Büro- und Handelsgebäude sowie Industrie- und Verwaltungsgebäude werden von den befragten Objektleitern bereits seit mehreren Jahren bzw. Jahrzehnten betreut. Es können daher tatsächliche Lebensdauerangaben unter entsprechenden Randbedingungen zur Validierung herangezogen werden.

Die Herausforderung für die Anwendung in der Praxis besteht hauptsächlich in der möglichst fachgerechten Bewertung aller maßgebenden Einflüsse. Hierbei ist auf ein Gleichgewicht zwischen Ermittlungsaufwand und der damit erreichbaren Genauigkeit zu achten. Die Szenarien für positive, negative und neutrale Einflüsse aus Tabelle 8-1 bis Tabelle 8-7 dienen dem Anwender als Anhaltspunkt zur Abschätzung der Einflüsse.

8.6.2 Büro- und Geschäftshaus in innerstädtischer Lage

Am Beispiel eines Büro- und Geschäftshauses mit Büros, Einzelhandel, Cafés und Restaurants auf über 10.000 Quadratmetern Nutzfläche in innerstädtischer Lage werden die tatsächlichen Lebensdauern einzelner Bauteile mit den theoretischen Werten aus der Modellberechnung verglichen.

Als Fenstermaterialien kommen beispielsweise Holz und Aluminium zum Einsatz. Unter Verwendung von Tabelle 8-23 sieht die Bewertungsmatrix für die einzelnen Kategorien wie folgt aus:

8 Vorhersage objektspezifischer Lebensdauern

Tabelle 8-24: Bewertungsmatrix der Bauteilgruppe Fenster an einem Büro- und Geschäftshaus

	Holzfenster	Aluminiumfenster	Bemerkung
Mittl. techn. Lebensdauer TLD_{ref}	36 a	47 a	aus Literatur und Datenerhebung
Komponentenqualität (A)	+	+	Markenprodukte mit geprüften Komponenten
Entwurfsqualität (B)	+	+	Standort- und funktionsgerechter Entwurf, seit Jahrzehnten bewährt
Ausführungsqualität (C)	+	+	Mäßige Komplexität, gute Ausführung und Qualitätssicherung
Innenräuml. Bedingungen (D)	++	++	Konstante Innenraumbedingungen, keine chemische oder biologische Belastung
Außenräuml. Bedingungen (E)	Ø	Ø	Durchschnittliche äußere Bedingungen im innerstädtischen Bereich
Gebrauchskonditionen (F)	-	-	Gewerbliche Nutzung mit durchschnittlicher Verschmutzung und überwiegendem Tagbetrieb
Instandhaltungsniveau (G)	+	+	Regelmäßige, zustandsorientierte Instandhaltung mit aktualisierter Gebäudedoku.
Spezifische Lebensdauer TLD_{EW}	39 a	54 a	

Vergleicht man die ermittelten spezifischen Lebensdauern aus dem Modell mit den tatsächlichen mittleren Lebensdauern aus dem Projekt, lassen sich nur geringe Abweichungen feststellen. Für Holzfenster beträgt die mittlere Lebensdauer 40 Jahre und für Aluminiumfenster werden mehr als 50 Jahre angesetzt, wobei dieser Wert durch den Objektleiter bislang nur geschätzt werden konnte. Anhand des direkten Vergleichs zwischen Holz- und Aluminiumfenstern durch den Objektleiter können die Werte für Aluminiumfenster als realistisch angesehen werden, auch wenn sie noch nicht auf tatsächlichen Austauschdaten beruhen.

Am Beispiel der Außenwandbekleidung wird mit der folgenden Bewertungsmatrix aufgezeigt, dass auch sehr negative Einflüsse durch das Bewertungsmodell abgedeckt werden können. In den 90er Jahren wurde ein Wärmdämmverbundsystem eingebaut, welches bereits nach 12 Jahren, aufgrund von mangelhafter Qualität und damit verbundener Durchfeuchtung, ausgetauscht werden musste. Da sich echte Baumängel hinsichtlich ihrer Auswirkungen nicht vollständig durch ein allgemeines Schema abdecken lassen, bleibt in diesem Fall eine Restungenauigkeit bestehen.

Tabelle 8-25: Bewertungsmatrix der Bauteilgruppe Außenwandbekleidung an einem Büro- und Geschäftshaus

	Wärmedämmverbundsystem	Bemerkung
Mittl. techn. Lebensdauer TLD_{ref}	44 a	
Komponentenqualität (A)	-	Mäßiges Produkt von günstigem Anbieter
Entwurfsqualität (B)	--	Schlechte Planung von Anschlüssen und Detailpunkten
Ausführungsqualität (C)	--	Mangelhafte Ausführung ohne Qualitätssicherung
Innenräuml. Bedingungen (D)	Kein Einfluss	
Außenräuml. Bedingungen (E)	Ø	Durchschnittliche äußere Bedingungen im innerstädtischen Bereich
Gebrauchskonditionen (F)	-	Ungeschütztes Bauteil und durchschnittliche Verschmutzung
Instandhaltungsniveau (G)	+	Regelmäßige, zustandsorientierte Instandhaltung mit aktualisierter Gebäudedoku.
Spezifische Lebensdauer TLD_{EW}	20 a	

Abschließend wurden anhand von 14 ausgewählten Bauteilen die jeweiligen Projektwerte mit den Modellergebnissen verglichen und in ein Diagramm eingetragen. Anhand des Verhältniswertes von tatsächlicher Größe zu vorhergesagter Größe (Modellunsicherheit gemäß Gleichung (8.6)) lässt sich die Qualität des Modells erkennen.

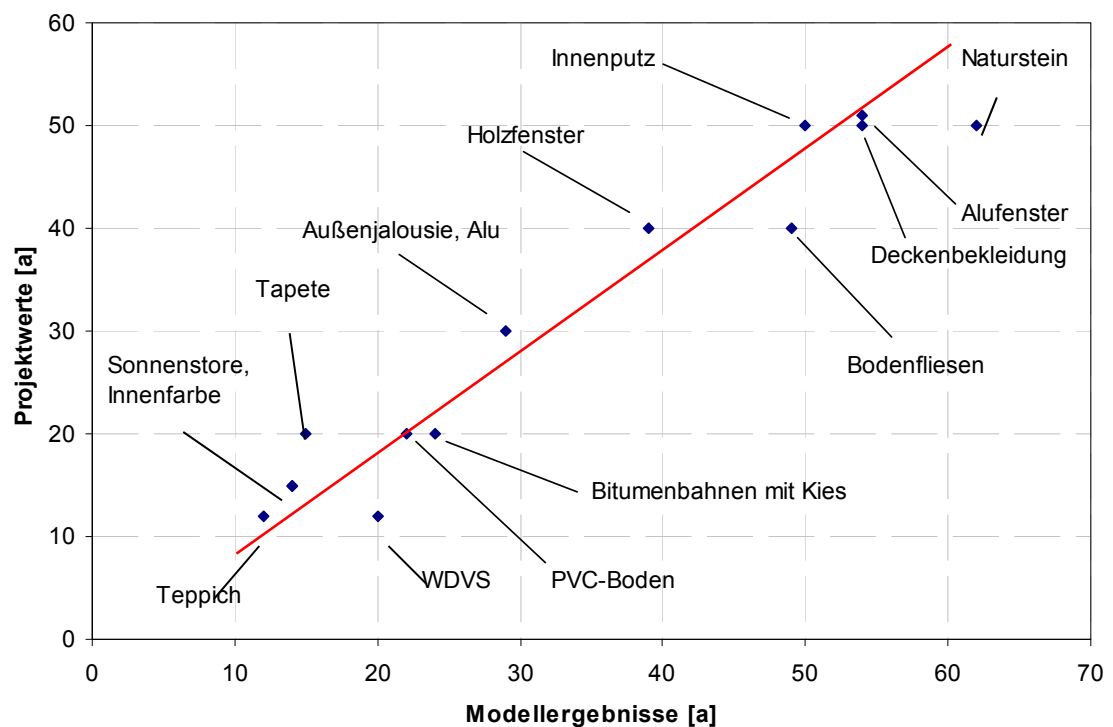


Abbildung 8-5: Vergleich der Lebensdauern [a] zwischen Modellergebnissen und wahren Projektwerten

Die in Abbildung 8-5 dargestellte erste Winkelhalbierende kennzeichnet die Idealwerte eines Modells (Realität = Modell).

$$\theta = \frac{\text{tatsächliche Größe}}{\text{vorhergesagte Größe}} = \frac{\text{Projektwert}}{\text{Modellergebnis}} \quad (8.6)$$

Der Mittelwert der Modellunsicherheit der 14 Bauteile liegt bei $m_\theta = 0,955$ bei einer Standardabweichung von $\sigma_\theta = 0,169$ und einem Variationskoeffizienten von $V_\theta = 0,177$. Als sicherer Bereich lässt sich in Abbildung 8-5 die Fläche oberhalb der Winkelhalbierenden ($\theta > 1$) bezeichnen, da die tatsächlichen Lebensdauern der Bauteile über den theoretischen Werten aus der Modellberechnung liegen. Die Fläche unterhalb der Winkelhalbierenden ($\theta < 1$) kann im Sinne der Modellverifikation als unsicher gelten, wobei nahezu alle „unsicheren“ Bauteile durch unplanmäßige Nutzungen frühzeitig ausgetauscht werden mussten.

8.6.3 Verwaltungsgebäude im stadtnahen Randgebiet in Süddeutschland

Im Rahmen eines weiteren PPP-Projektes können objektspezifische Lebensdauern TLD_{Ew} mit tatsächlichen Lebensdauern aus Objektleiterbefragungen verglichen werden. Als Randbedingungen der verschiedenen Gebäude dieses Industrieparks in Süddeutschland sind beispielsweise die geografische Lage am Alpenrand mit erhöhter Schneebelastung und relativ wenig Luftverschmutzung zu nennen. Die Nutzung als Büro-, Industrie- und Forschungsstandort bedingt einen gemischten Tag- bzw. Tag-Nacht-Betrieb. Die Instandhaltung wird regelmäßig und zustandsorientiert durchgeführt. Anhand der Szenarien aus Tabelle 8-1 bis Tabelle 8-7 können mögliche Einflussgrößen bestimmt werden.

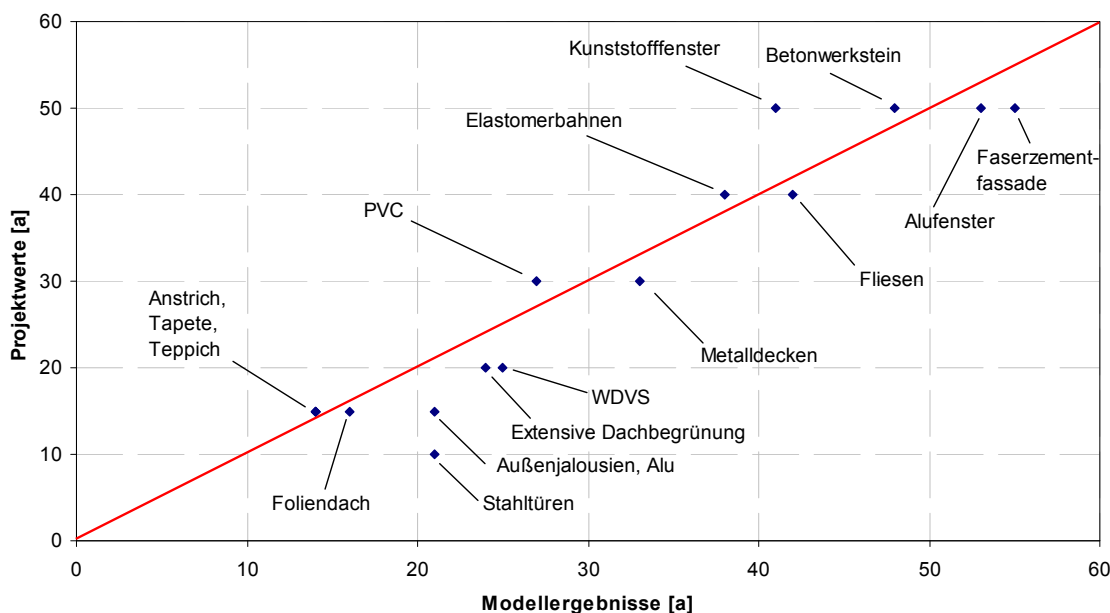


Abbildung 8-6: Vergleich der Lebensdauern [a] zwischen Modellergebnissen und wahren Projektwerten

Anhand von 16 ausgewählten Bauteilen werden die jeweiligen Projektwerte mit den Modellergebnissen verglichen und die Modellunsicherheit bestimmt. Der Mittelwert der Modellunsicherheit am Beispiel dieser Industrie- und Verwaltungsgebäude liegt bei $m_\theta = 0,945$ mit einer Standardabweichung von $\sigma_\theta = 0,179$ und einem Variationskoeffizienten von $V_\theta = 0,189$.

8.7 Modellvergleich und Sensitivität

Wie bereits mehrfach in dieser Arbeit erwähnt, ist die Anwendung der Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 in der Praxis bislang nur bedingt möglich. Es fehlen sowohl fundierte Referenzlebensdauern, als auch konkrete Werte für die Einflussfaktoren. Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modell werden durch die praxisgerechte Berücksichtigung der objektspezifischen Einflussfaktoren sowohl Genauigkeit, als auch Transparenz und Überprüfbarkeit bei der Lebensdauerprognose verbessert, wodurch die Anzahl der erforderlichen Austauschzyklen von Bauteilen über den Gebäudelebenszyklus wesentlich genauer bestimmt werden kann. Anhand von Bauteilen verschiedener Gewerke an unterschiedlichen Objekten wird das entwickelte Modell mit der Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 und der in der Praxis am häufigsten verwendeten Kennwertemethode gegenübergestellt und mit den tatsächlichen Lebensdauerangaben aus dem Projekt verglichen. Die Faktorenmethode wird dabei nicht nur allein nach positiven und negativen Einflüssen mit den Werten 0,8 und 1,2 gewichtet, sondern es erfolgt eine Staffelung analog des neu entwickelten Modells in fünf Stufen von 0,8 bis 1,2 und einer Schrittweite von 0,1.

Tabelle 8-26: Bewertungsmatrix der Bauteilgruppe Innenwandbekleidung

Holzverkleidung	DIN ISO 15686	Neues Modell	Bemerkung
Mittl. techn. Lebensdauer TLD_{ref}	51 a	51 a	
Komponentenqualität (A)	1,0	Ø	Brauchbares Produkt mittlerer Preiskategorie
Entwurfsqualität (B)	1,0	Ø	Übliche Planung von Anschlüssen und Detailpunkten
Ausführungsqualität (C)	0,8	--	Mangelhafte Ausführung ohne Qualitätssicherung
Innenräuml. Bedingungen (D)	1,0	Ø	Durchschnittliche innenräumliche Bedingungen mit annähernd konstanter Temperatur
Außenräuml. Bedingungen (E)	Kein Einfluss	Kein Einfluss	
Gebrauchskonditionen (F)	0,8	--	Ungeschütztes Bauteil mit übermäßiger Verschmutzung
Instandhaltungsniveau (G)	1,0	Ø	Zustandsorientierte Instandhaltung und praxisübliche Bewirtschaftung
Spezifische Lebensdauer TLD_{Ew}	33 a	21 a	

Als erstes Beispiel wird die Lebensdauer der Innenwandbekleidung aus Holz in einem innerstädtischen Einkaufscenter modelliert. Bei dem gewählten Objekt handelt es sich um ein sogenanntes Mischcenter mit über 60 Fachgeschäften, Restaurants und einem Fitnesscenter. Die Holzverkleidung befindet sich an öffentlichen Wandflächen mit Publikumsverkehr und musste nach 15 Jahren aufgrund von optischen Mängeln und Schäden an den Befestigungselementen ausgetauscht werden. Tabelle 8-26 zeigt die entsprechende Bewertungsmatrix für Faktorenmethode und neu entwickeltem Modell. Der Vergleich der Modellunsicherheiten nach Gleichung (8.6) zeigt in Tabelle 8-27 die Qualität des neuen Prognoseverfahrens.

Tabelle 8-27: Modellvergleich am Beispiel Innenwandbekleidung aus Holz

Holzverkleidung (innerstädt. Einkaufscenter)	Kennwertemethode	Faktorenmethode nach DIN ISO 15686	Neues Modell
Lebensdauerprognose TLD_{Ew}	51 Jahre	33 Jahre	21 Jahre
Modellunsicherheit θ	0,294	0,455	0,714

Am Beispiel eines weiteren PPP-Projektes soll die Lebensdauer der Schmutzfangmatten im Eingangsbereich eines öffentlichen Gebäudes berechnet werden. Das Objekt wird als Mischgebäude mit Büros, Restaurant und Veranstaltungsräumen genutzt. Die Schmutzfangmatten werden spätestens nach 5 Jahren aufgrund von Schäden und übermäßiger Verschmutzung (optischer Anspruch) ausgetauscht.

Tabelle 8-28: Bewertungsmatrix der Bauteilgruppe Bodenbeläge

Schmutzfangbeläge	DIN ISO 15686	Neues Modell	Bemerkung
Mittl. techn. Lebensdauer TLD_{ref}	8 a	8 a	
Komponentenqualität (A)	1,1	+	Hochwertiges Produkt mit guter Verarbeitung
Entwurfsqualität (B)	1,0	Ø	Übliche Planung von Sauberaufzonen und Materialien
Ausführungsqualität (C)	1,2	++	Sehr gute Qualität des Ausführenden, geringe Komplexität
Innenräuml. Bedingungen (D)	0,8	--	Eintrag von Feuchtigkeit und wechselnde Temperaturverhältnisse im Eingangsbereich
Außenräuml. Bedingungen (E)	Kein Einfluss	Kein Einfluss	
Gebrauchskonditionen (F)	0,8	--	Ungeschütztes Bauteil mit hohem Verschmutzungsgrad
Instandhaltungsniveau (G)	1,0	Ø	Zustandsorientierte Instandhaltung und praxisübliche Bewirtschaftung
Spezifische Lebensdauer TLD_{Ew}	7 a	6 a	

Auch hier zeigt sich die Qualität des neuen Verfahrens anhand des Verhältnisses von tatsächlichem Wert und theoretischer Prognose.

Tabelle 8-29: Modellvergleich am Beispiel Schmutzfangbeläge

Schmutzfangbeläge (Öffentl. Gebäude, innerstädt.)	Kennwertemethode	Faktorenmethode nach DIN ISO 15686	Neues Modell
Lebensdauerprognose TLD_{Ew}	8 Jahre	7 Jahre	6 Jahre
Modellunsicherheit θ	0,625	0,714	0,833

Der durchschnittliche Verhältniswert von Projektwert zu Modellergebnis liegt gemittelt über alle konkreten Objekte bei $m_\theta = 0,942$ mit Standardabweichung $\sigma_\theta = 0,172$ und Variationskoeffizient $V_\theta = 0,183$ im Vergleich zur Kennwertemethode mit ähnlicher Modellunsicherheit aber größerer Streuung ($m_\theta = 0,894 / \sigma_\theta = 0,336 / V_\theta = 0,375$) und der Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 mit kleinerer Modellunsicherheit 0,797 und ähnlicher Streuung ($m_\theta = 0,797 / \sigma_\theta = 0,161 / V_\theta = 0,201$). In Abbildung 8-7 sind abschließend alle Lebensdauerdaten aus konkreten Projekten den Modellwerten der verschiedenen Verfahren gegenübergestellt. Anhand der Trendlinien der einzelnen Modelle im Vergleich zur idealen Winkelhalbierenden wird die Qualität des neuen Modells auch in der Darstellung ersichtlich.

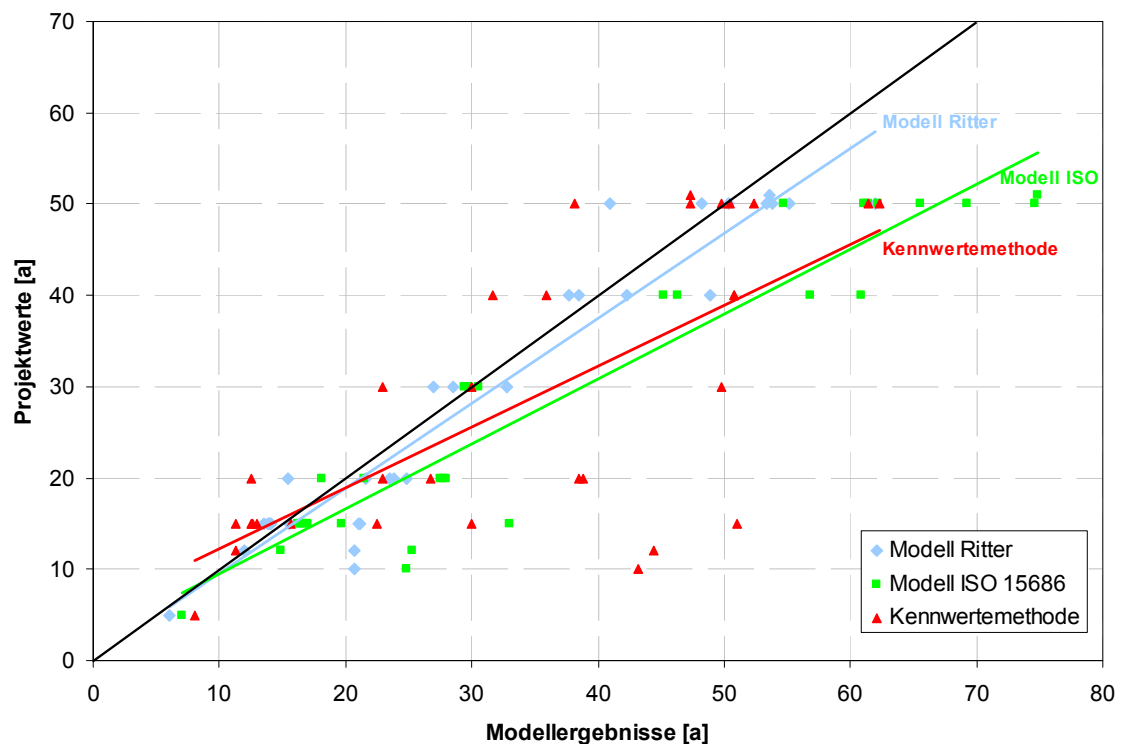


Abbildung 8-7: Modellvergleich anhand der Modellunsicherheiten

Die im Folgenden beschriebene Sensitivitätsstudie ermöglicht eine Analyse der Auswirkungen einzelner Einflussgrößen auf die objektspezifische Bauteillebensdauer TLD_{Ew} . Es werden Simulationen bei variierenden Eingaben über den kompletten Bereich der untersuchten Einflussgrößen durchgeführt und die Ergebniswerte nach jedem Simulationsschritt protokolliert. Aus diesen Ergebnissen geht die Auswirkung des sich ändernden

Eingabewertes auf die Simulationsresultate hervor, so dass die Empfindlichkeit des Ergebnisses gegenüber den jeweiligen Einflussgrößen ermittelt werden kann. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse werden jeweils bauteilgruppenweise mithilfe von Tornado-Diagrammen anhand eines Beispiels diskutiert. Es werden keine Einflussgrößenvorgaben berücksichtigt, so dass der komplette Bereich der Einflussfaktorenverteilungen von Min bis Max in die Ergebnisse eingeht. Die Anzahl der Simulationen wurde abhängig von den Einflussgrößen zwischen 40 und 50, bei einer jeweiligen Iterationsanzahl von 1000, gewählt.

Abbildung 8-8 a) zeigt die möglichen Auswirkungen der einzelnen Einflusskategorien auf die mittlere Lebensdauer von Aluminiumfenstern. Ausgehend von einem Ausgangswert der objektspezifischen Lebensdauer $TLD_{EW} = 43,9$ Jahre, liegt die Empfindlichkeit des Ergebnisses gegenüber den einzelnen Einflusskategorien zwischen 19,8% für Faktor B und 49,7% für Faktor E. Die wesentlichsten Einflüsse werden durch die außenräumlichen Umgebungsverhältnisse verursacht.

Die möglichen Auswirkungen auf die Lebensdauer von Vollholztüren sind sowohl in ihren Werten als auch in den Einflüssen relativ ähnlich zu denen der Aluminiumfenster. In Abbildung 8-8 b) ist die Sensitivität von $TLD_{EW} = 41,3$ Jahre gegenüber den Einflüssen dargestellt. Sie schwankt zwischen 21,3% für die innenräumlichen und 53,8% für die außenräumlichen Verhältnisse.

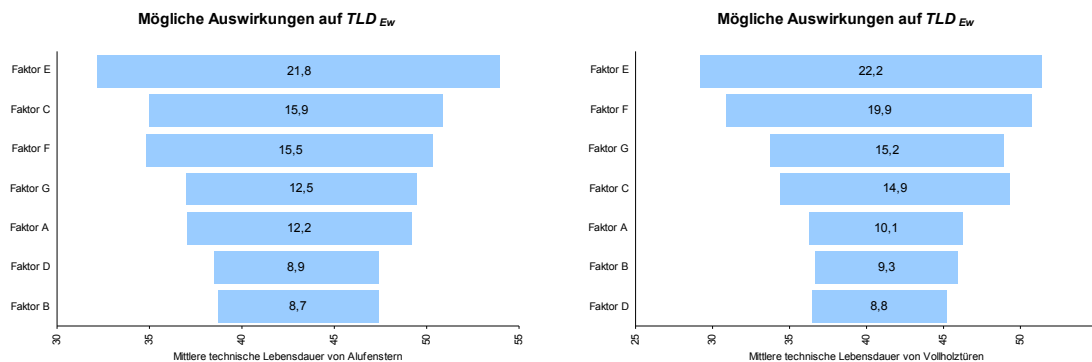


Abbildung 8-8: a) Mögliche Auswirkungen auf die mittlere technische Lebensdauer von Alufenstern
b) Mögliche Auswirkungen auf die mittlere technische Lebensdauer von Vollholztüren

Die Auswirkungen auf ein beispielhaftes Wärmedämmverbundsystem sind in Abbildung 8-9 a) dargestellt. Die Sensitivität des Ergebnisses liegt zwischen 33,1% für den Faktor G und 70,4% für den Faktor E bei einem Ausgangswert der objektspezifischen Lebensdauer von $TLD_{EW} = 48,3$ Jahren. Durch entsprechende außenräumliche Umgebungsverhältnisse kann die Lebensdauer von Außenwandbekleidung somit nahezu verdoppelt bzw. erheblich verkürzt werden. Alle weiteren Faktoren haben deutlich weniger Einfluss auf die Lebensdauer.

Abbildung 8-9 b) zeigt die möglichen Auswirkungen der Einflusskategorien auf die Lebensdauer von Aluminiumjalousien. Ausgehend von $TLD_{EW} = 28,9$ Jahre, liegt die Empfindlichkeit des Ergebnisses gegenüber den einzelnen Einflusskategorien zwischen 24,9% für die Planungsqualität und 53,3% für die Instandhaltungsqualität. Für Sonnenschutzelemente haben die Faktoren C, E, F und G ähnlich große Einflussmöglichkeiten auf die Lebensdauer, so dass in der praktischen Anwendung möglichst alle Faktoren bewertet werden sollten.

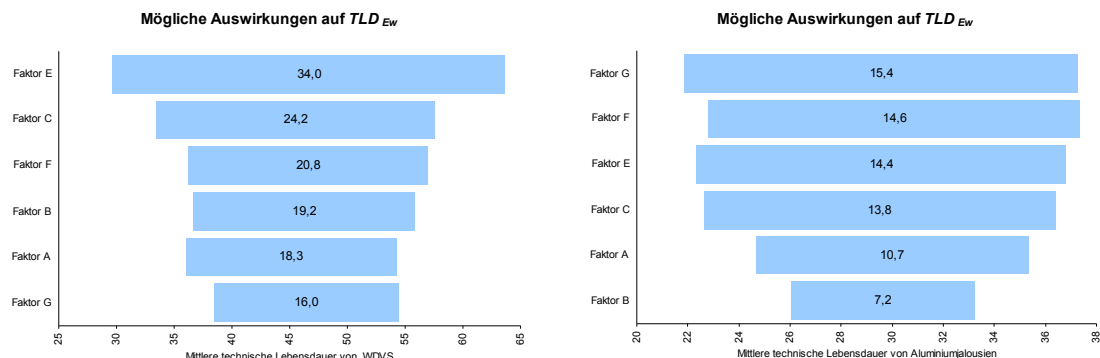


Abbildung 8-9: a) Mögliche Auswirkungen auf die mittlere technische Lebensdauer von WDVS
b) Mögliche Auswirkungen auf die mittlere technische Lebensdauer von Alujalousien

Die möglichen Auswirkungen auf die Lebensdauer von Tapeten sind in Abbildung 8-10 a) dargestellt. Ausgehend von einer mittleren objektspezifischen Lebensdauer $TLD_{EW} = 11,9$ Jahre, liegt die Empfindlichkeit des Ergebnisses gegenüber den einzelnen Einflusskategorien zwischen 21,0% für Faktor B und 55,5% für Faktor F.

Abbildung 8-10 b) zeigt die Auswirkungen auf die Lebensdauer von Textilen Bodenbelägen. Die Empfindlichkeit des Ergebnisses liegt zwischen 23,1% für den Faktor D und 63,0% für die Nutzungsbedingungen bei einer mittleren objektspezifischen Lebensdauer von $TLD_{EW} = 10,8$ Jahren. Die möglichen Faktoren sind ähnlich gestaffelt wie bei Tapeten. Ausführungsqualität, Nutzung und Instandhaltung sind die maßgebenden Faktoren, die die Lebensdauer beeinflussen.

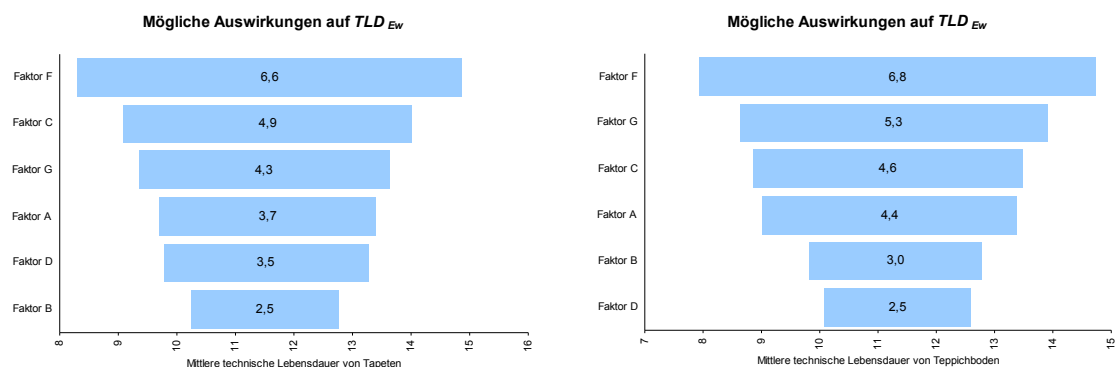


Abbildung 8-10: a) Mögliche Auswirkungen auf die mittlere technische Lebensdauer von Tapeten
b) Mögl. Auswirkungen auf die mittl. techn. Lebensdauer von textilen Bodenbelägen

Die möglichen Auswirkungen auf Metalldeckenbekleidungen sind in Abbildung 8-11 a) dargestellt. Die Empfindlichkeit des Ergebnisses liegt zwischen 21,1% für den Faktor G und 47,7% für den Faktor F bei einem Ausgangswert der objektspezifischen Lebensdauer von $TLD_{Ew} = 47,8$ Jahren. Die Einflüsse auf Deckenbekleidungen sind eher gering anzusehen, wobei sich Nutzung und Ausführungsqualität gegenüber den sonstigen Faktoren deutlich abheben.

In Abbildung 8-11 b) sind die möglichen Auswirkungen der Einflusskategorien auf die Lebensdauer von Kunststoffdachflächenfenstern dargestellt. Der stochastische Ausgangswert der mittleren technischen Lebensdauer liegt bei $TLD_{Ew} = 34,6$ Jahren. Die Empfindlichkeit des Ergebnisses gegenüber den einzelnen Einflusskategorien zwischen 16,2% für die Planungsqualität und 48,8% für die außenräumlichen Verhältnisse ist ähnlich wie bei normalen senkrecht eingebauten Fenstern in Abbildung 8-8 a).

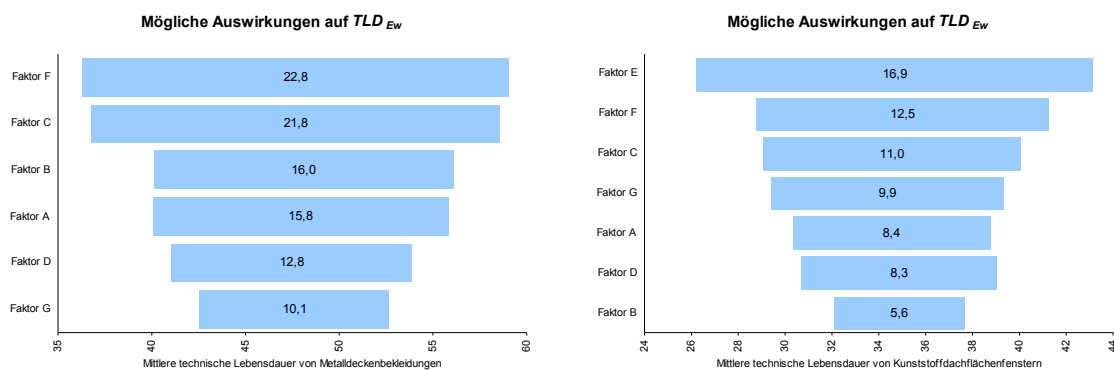


Abbildung 8-11: a) Mögl. Auswirkungen auf die mittl. techn. Lebensdauer von Metalldeckenbekleidungen
b) Mögl. Auswirkungen auf die mittl. techn. Lebensdauer von Dachflächenfenstern

Abbildung 8-12 a) zeigt die möglichen Auswirkungen der einzelnen Einflusskategorien auf die mittlere Lebensdauer von Betondachsteinen. Ausgehend von einer mittleren objektspezifischen Lebensdauer $TLD_{Ew} = 44,1$ Jahre, liegt die Empfindlichkeit des Ergebnisses gegenüber den einzelnen Einflusskategorien zwischen 32,9% für Faktor F und 53,5% für Faktor E. Die wesentlichen Einflüsse B, C, E und G liegen relativ dicht beieinander, so dass auch hier eine Bewertung möglichst aller Einflussfaktoren zu empfehlen ist.

Die möglichen Auswirkungen auf die Lebensdauer von Dachrinnen aus Kupfer liegen ebenfalls eng zusammen. In Abbildung 8-12 b) ist die Empfindlichkeit des Ausgangswerts $TLD_{Ew} = 62,4$ Jahre gegenüber den Einflüssen dargestellt. Sie schwankt zwischen 34,0% für die Produktqualität und 54,3% für die außenräumlichen Verhältnisse.

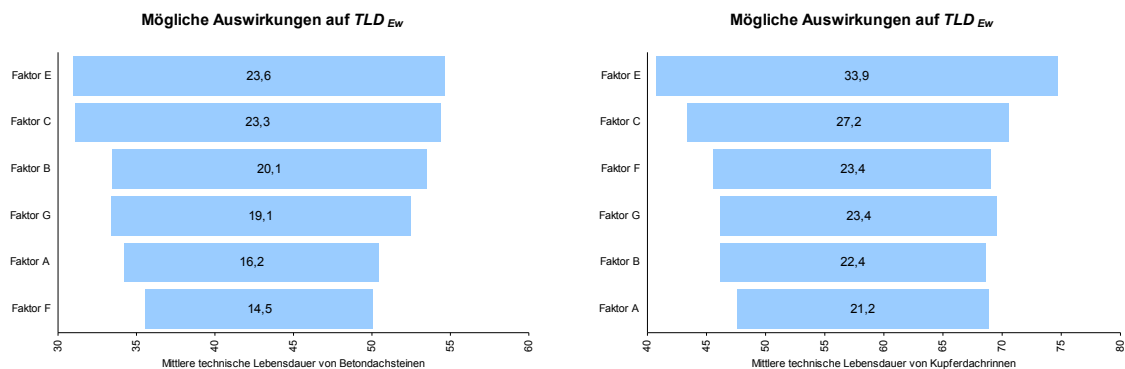


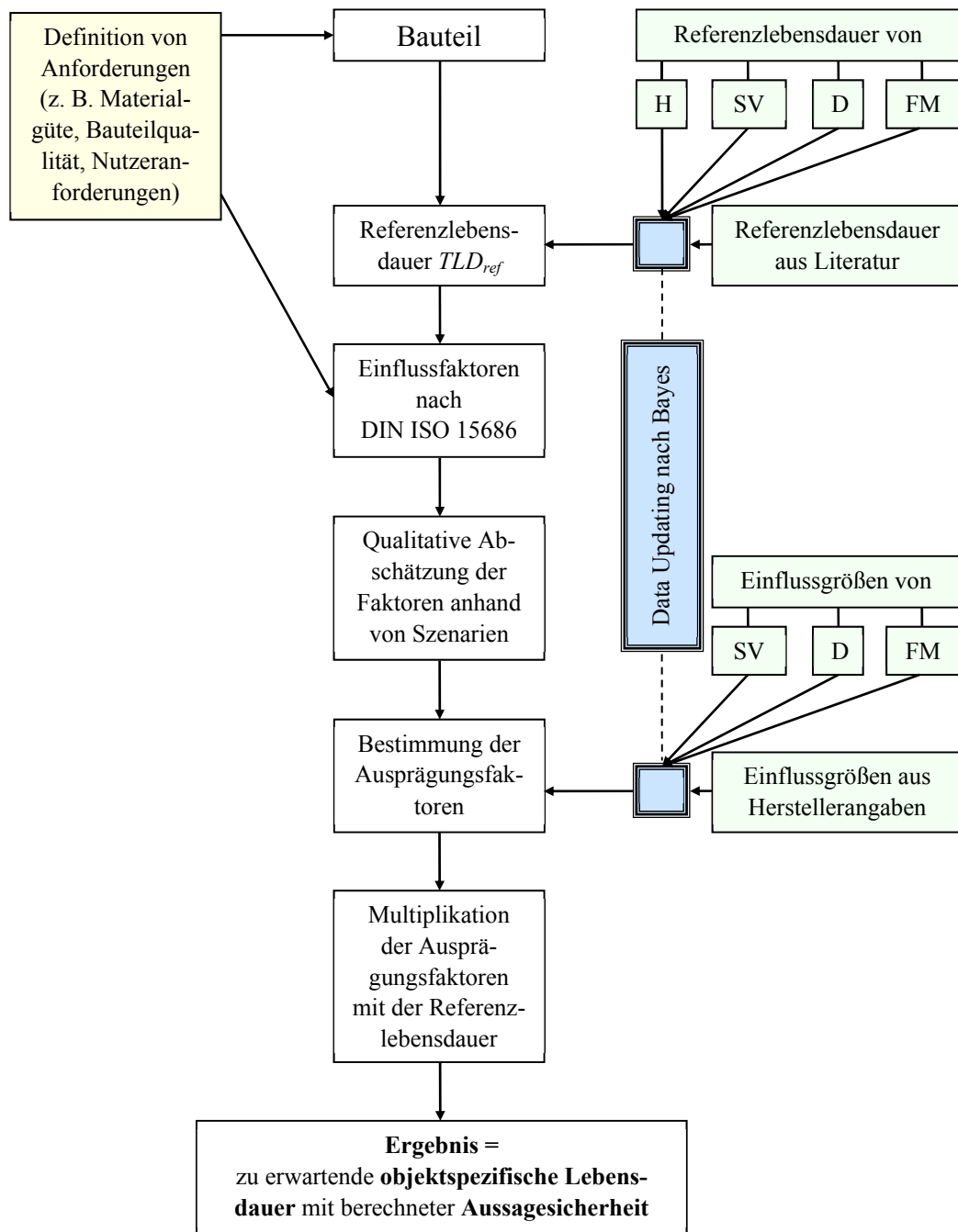
Abbildung 8-12: a) Mögl. Auswirkungen auf die mittlere technische Lebensdauer von Betondachsteinen
b) Mögl. Auswirkungen auf die mittlere technische Lebensdauer von Kupferdachrinnen

Die gezeigten Bauteile sind beispielhaft für die jeweiligen Bauteilgruppen zu sehen, so dass zumindest die Wichtung der einzelnen Einflüsse untereinander für die komplette Bauteilgruppe festgehalten werden kann. Die Quantifizierung der Einflüsse ist von der Variabilität der Basisdaten abhängig. Je größer die Bandbreite der möglichen Lebensdauer zwischen TLD_{min} und TLD_{max} , desto größer sind auch die entsprechenden Einflussgrößenfaktoren $X_{Auspr.}$. Da bislang nur wenige wissenschaftliche Arbeiten zu Schädigungsmechanismen und Ausfallkriterien aller Bauteile vorliegen, lässt sich abschließend festhalten, dass die gewonnenen Einschätzungen der Experten aus Datenerhebung und persönlichen Interviews derzeit die beste Lösung zur Bewertung der Einflussfaktoren und deren Auswirkungen sind.

8.8 Zusammenfassung

Das vorliegende Kapitel 8 beschäftigt sich mit der Entwicklung eines wissensbasierten Prognosemodells zur Vorhersage objektspezifischer Lebensdauern. Aufbauend auf der Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 werden in Abschnitt 8.2 die Einflussfaktoren A bis G in bewertbare Unterkategorien unterteilt und mit jeweils einem Szenario für positive, negative und neutrale Einflüsse belegt. Die minimalen und maximalen Faktorwerte je Bauteil werden aus den Ergebnissen der Expertenbefragungen berechnet, so dass sich über Gleichung (8.5) die spezifische Lebensdauer eines Bauteils in einem konkreten Umfeld (TLD_{Ew}) bestimmen lässt. Abschnitt 8.3 gibt die Ergebnisse der einzelnen Bauteilgruppen aus den Datenerhebungen wieder. Es werden sowohl die Ergebnisse der 33 abgefragten Unterkategorien als auch die Ergebnisse der 7 Einflussgrößenkategorien je Bauteil angegeben, die im entwickelten Modell bewertet werden sollen. Die eigentliche Bewertung der Einflussgrößen obliegt dem Anwender, der sich bei seiner Auswahl an den Szenarien nach Tabelle 8-1 bis Tabelle 8-7 orientieren kann. Abschnitt 8.4 stellt für jede Bauteilgruppe die gebräuchlichsten Bauteile mit ihren Ergebniswerten in vereinfachter Übersicht zusammen. Neben dem Referenzwert der mittleren technischen Lebensdauer, sind

die minimale und maximale technische Lebensdauer sowie die Grenzfaktoren der Einflussgrößen angegeben. In Verbindung mit Gleichung (8.5) kann über die minimalen und maximalen Faktoren der Einflussgrößen A bis G nach DIN ISO 15686 die jeweilige objektspezifische Bauteillebensdauer berechnet werden. In Abschnitt 8.5 erfolgt eine Erweiterung des entwickelten Modells durch die Abbildung unbekannter Faktoren als Zufallsgrößen mit entsprechender Wahrscheinlichkeitsverteilung. Anhand eines Beispiels werden die verschiedenen Einflussfaktoren A bis G als Normalverteilung, Lognormalverteilung und einfache Dreiecksverteilung modelliert und die Ergebnisse verglichen. Auf dieser Basis, unter Berücksichtigung von Fehlerbetrachtungen, werden die Faktoren als Dreiecksverteilung mit den entsprechenden Min- und Max-Werten aus den Gleichungen (8.3) und (8.4) um den Wert 1,0 modelliert. In Abschnitt 8.6 erfolgt die Validierung des entwickelten Modells anhand von tatsächlichen Bauteillebensdauern konkreter Objekte. Am Beispiel zweier PPP-Projekte werden die objektspezifischen Randbedingungen einzelner Bauteile in das Prognosemodell eingegeben und die berechnete Lebensdauer mit den tatsächlichen Austauschwerten verglichen. Der abschließende Modellvergleich anhand weiterer Objekte aus der Praxis mit Sensitivitätsanalyse der einzelnen Faktoren in Abschnitt 8.7 rundet die Modellentwicklung ab und zeigt die Vorzüge des neuen Prognosetools sowie die möglichen Auswirkungen der einzelnen Faktoren auf die spezifische Lebensdauer. Die Vorgehensweise des entwickelten Modells ist in nachfolgender Grafik dargestellt.



H = Hersteller, SV = Sachverständige, D = Dienstleister, FM = Facility Management-Anbieter

Abbildung 8-13: Ablaufschema des Prognosemodells

9 ANWENDUNG IM BEREICH LEBENSZYKLUSANALYSE

9.1 Einführung

Lebenszyklusanalysen werden häufig zur allgemeingültigen Bewertung von Bauteilen oder Objekten hinsichtlich ökologischer oder ökonomischer Auswirkungen durchgeführt, so dass die Anwendung des vollständigen Prognosemodells aufgrund des Bewertungsaufwands nicht für alle Bauteile zu empfehlen ist. Trotzdem bilden die neu ermittelten Referenzwerte für Lebensdauern eine Datenbasis, die eine Verbesserung der Aussagekraft von Lebenszyklusbetrachtungen darstellt. Die in Abschnitt 9.2 beschriebene Verwendung der Daten im Rahmen der Lebenszyklusanalyse von hybriden Innenbauteilen kann nur einen kleinen Einblick in das weite Feld der Ökobilanzierung bieten, jedoch ist die Untersuchung der Trennbarkeit unterschiedlicher Materialsichten in Verbundbauteilen ein wichtiger Aspekt, der sich wiederum auf die Lebensdauer der betroffenen Schichten auswirkt.

9.2 Grundlagen der Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 und 14044

Gegenstand der wissenschaftlich anerkannten Methode der Ökobilanz (life cycle assessment, LCA) ist die Ermittlung und Bilanzierung der relevanten Input- und Outputflüsse eines Produktsystems, sowie einer anschließenden abschätzenden Auswertung der resultierenden Umweltwirkungen. Verankert in den Normen DIN EN ISO 14040 (2006) und 14044 (2006) bildet die Methode der Ökobilanz die Grundlage für viele in der Praxis verfügbare Verfahren und Instrumente. Die Methode ermöglicht eine Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus und ist somit auch für Bewertungen im Baubereich sehr gut geeignet. Eingesetzt werden kann die Methode zu jedem Zeitpunkt im Gebäudelebenszyklus, zu dem exakte Daten bezüglich des zur Betrachtung vorgesehenen Produkts vorliegen. Entsprechend kann die Ökobilanz zur vorausschauenden Abschätzung der Umweltwirkungen eines Produktes eingesetzt werden, jedoch auch zur begleitenden Abschätzung der Wirkungen über den Lebenszyklus.

Eine Ökobilanz gliedert sich nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 in die vier im Folgenden genannten Arbeitsschritte, die durch entsprechende Anforderungen gekennzeichnet sind:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Durchführung der Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Abbildung 9-1 zeigt eine Übersicht zur Anordnung und Abfolge der einzelnen Schritte.

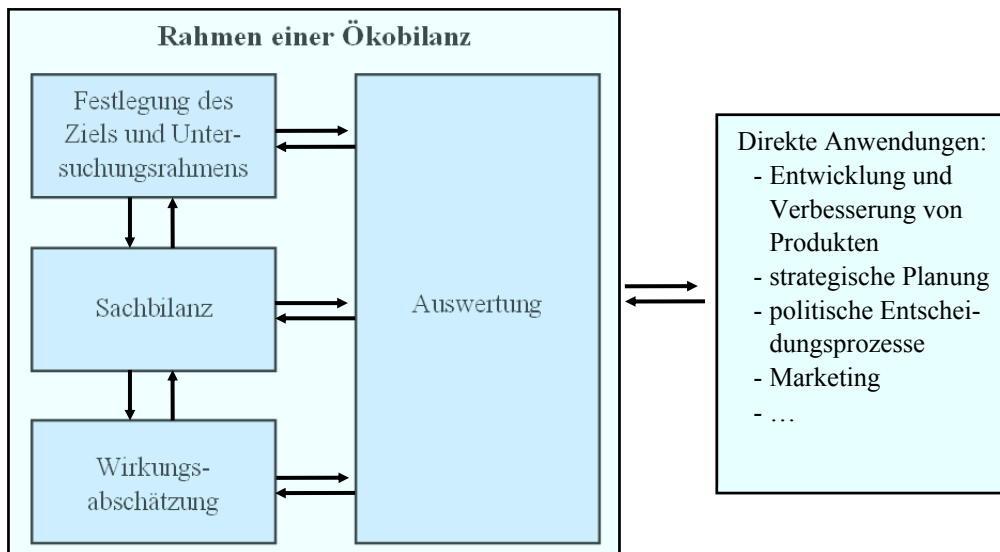


Abbildung 9-1: Aufbau einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 (2006)

Der erste Arbeitsschritt der Ökobilanz besteht nach DIN EN ISO 14040 (2006) aus den zwei Teilabschnitten „Festlegung des Ziels“ und „Festlegung des Untersuchungsrahmens“. Die „Festlegung des Ziels“ umfasst hierbei Angaben zu den Gründen der Durchführung der Ökobilanz, sowie eine Definition des Adressaten der Untersuchung. Der ebenfalls festgelegte Untersuchungsrahmen besteht aus Angaben zur Systemgrenze, der funktionellen Einheit und Informationen zur Datenqualität. Die Systemgrenze definiert sich hierbei als der technische und geografische Erfassungsraum der Daten, sowie der Zeitraum über den die Ökobilanz erstellt wird. Idealerweise ist die Systemgrenze so gewählt, dass an ihren Grenzen nur noch Elementarflüsse als Input oder Output auftreten. Die Sicherstellung der Vergleichbarkeit von zwei oder mehreren Ökobilanzen erfordert die Festlegung einer funktionellen Einheit. Sie ist die Größe, auf die alle Input- und Outputströme bezogen werden. Vergleichbar sind zwei Ökobilanzen, wenn sie die gleiche Funktion erfüllen oder denselben Nutzen erzeugen und die identische Systemgrenze haben.

In der im zweiten Arbeitsschritt der Ökobilanz zu erstellenden Sachbilanz werden die Daten der Input- und Outputströme des Produktsystems gesammelt und quantifiziert. In ihr wird ein Bezug zwischen den Energie- und Stoffverbräuchen sowie der funktionellen Einheit hergestellt. Die Sachbilanz stellt die Grundlage für die spätere Wirkungsabschätzung dar.

Im Arbeitsschritt „Wirkungsabschätzung“ werden aus den in der Sachbilanz zusammengetragenen Daten potentielle Umweltauswirkungen abgeleitet. Hierzu werden die einzelnen aus der Sachbilanz resultierenden Stoff- und Energieströme spezifischen, für die Untersu-

chung ausgewählten, Kriterien zugeordnet (Klassifizierung) und gemäß ihres Beitrags zur mit dem Kriterium verbundenen Umweltwirkung gewichtet (Charakterisierung). Neben der erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergie als Kenngrößen für den Ressourcenverbrauch, sind dabei folgende Umweltindikatoren, als mögliche Kriterien einer Ökobilanz zu nennen:

- Abiotischer Ressourcenverbrauch
- Treibhauspotential
- Ozonabbaupotential
- Versauerungspotential
- Eutrophierungspotential
- Photochemisches Oxidantienbildungspotential

In dem die Ökobilanz abschließenden Arbeitsschritt „Auswertung“ werden die Ergebnisse der Studie dargestellt und interpretiert. Zudem erfolgt eine Beurteilung der Güte der Ökobilanz durch die Prüfung auf Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz. Kontrolliert wird zudem die Übereinstimmung der Ergebnisse mit dem in Arbeitsschritt 1 definierten Ziel, sowie dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz. Der Arbeitsschritt enthält zudem Schlussfolgerungen, Erläuterungen von Einschränkungen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen.

9.3 Einführung in die Lebenszyklusanalyse hybrider Innenbauteile

Wie bereits in Kapitel 3.1 ausführlich erläutert, ist die Lebensdauer im Bereich der Lebenszyklusanalysen von zentraler Bedeutung. Zukünftig sind mit der Einführung des Deutschen Gütesiegels für Nachhaltiges Bauen sämtliche Umweltwirkungen einer Baukonstruktion über alle Lebenszyklusphasen quantitativ mit Hilfe einer Ökobilanz zu bestimmen. Dies bedeutet, dass neben der Herstellung und Entsorgung auch alle Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen in die Gebäudebewertung einfließen müssen.

Für die Beurteilung der über den Lebenszyklus erforderlichen Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen standen bislang keine Informationen zur Trennbarkeit unterschiedlicher Materialschichten in Verbundbauteilen zur Verfügung. In den bisherigen Betrachtungen wurde generell von einer vollständigen Lösbarkeit einzelner Schichten ausgegangen, was aber inzwischen im Rahmen eines durch die Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung geförderten Forschungsprojekts (Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7- 09.4 / II 2 – F20-09-1-076) widerlegt werden konnte (siehe Graubner & Ritter (2010)). Die Berücksichtigung der Schichtabhängigkeiten - also der Trennbarkeit der verwendeten Materialien - beeinflusst die Ergeb-

nisse erheblich. Ansatz für das Forschungsprojekt war die Beurteilung des Energie- und Materialverbrauchs infolge von Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen während des Lebenszyklus eines Gebäudes. Dazu wurde der Energie- und Materialverbrauch vom sanierungsbedürftigen Bauteil über den Rückbau bis zur Herstellung der fertigen Tragschicht für das Aufbringen der neuen Bekleidung betrachtet. Durch die Ergebnisse des Forschungsvorhabens kann der Energie- und Materialverbrauch bei Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen von Gebäuden im Sinne des Nachhaltigkeitsgedankens optimiert werden. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens erstellte Bewertungsmethodik zur Beurteilung der Instandhaltungsfreundlichkeit, Rückbaubarkeit und Recyclingfreundlichkeit ermöglicht eine objektive Zertifizierung im Rahmen des Deutschen Gütesiegels für Nachhaltiges Bauen.

Die Ökobilanz der Herstellung und Entsorgung der einzelnen Beläge und Bekleidungen konnte im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht betrachtet werden, so dass keine ganzheitliche Betrachtung über den Lebenszyklus eines Gebäudes möglich war. Dieses Manko wird nun, durch die Berücksichtigung der verschiedenen Lebensdauern und der entsprechenden Umweltwirkungen bei Herstellung und Entsorgung, als Anwendungsmöglichkeit der Ergebnisse dieser Arbeit in den folgenden beiden Kapiteln behoben.

Folgende mittlere technische Lebensdauern werden der Ökobilanz zugrunde gelegt:

Tabelle 9-1: Mittlere technische Lebensdauer als Basis der Ökobilanz (Bezugszeitraum 50 Jahre)

<u>Böden:</u>	TLD_{mittel} [a]	<u>Wände:</u>	TLD_{mittel} [a]
<u>Konstruktion und Aufbau:</u>		<u>Konstruktion und Aufbau:</u>	
Stahlbeton-Deckenplatte	95	Gipskartonwand	54
Zementestrich	56	Ziegelwand	101
Anhydritestrich	58	Kalksandsteinwand	118
Gussasphaltestrich	59	Stahlbetonwand	102
Trockenestrich	54	Zementputz	53
		Gipsputz	51
<u>Bekleidung/Belag:</u>		<u>Bekleidung/Belag:</u>	
Bodenfliesen	51	Wandfliesen	50
Laminat	14	Tapeten	13
Textiler Bodenbelag	11	Dispersionsfarbe	12
Naturstein	71	Holzverkleidung	51

Neben einer reinen lebensdauerbasierten Betrachtung wird ein zweites Szenario mit einem einmaligen Mindestaustausch aller Beläge aus Modernisierungsgründen vorgesehen, um eine praxisnahe Beurteilung zu gewährleisten. Die in der Literatur häufig verwendete Austauschrate berechnet sich dabei aus dem Verhältnis zwischen der voraussichtlichen Lebensdauer des Tragwerks (Bezugszeitraum 50 Jahre) und der voraussichtlichen Lebensdauer der jeweiligen Schichtgruppe unter Berücksichtigung der Lösbarkeit.

9.4 Ökologische Bewertung von hybriden Innenbauteilen

Als Untersuchungsrahmen ist die Bewertung der Umweltwirkung von Boden- und Wandbelägen über einen Bezugszeitraum von 50 Jahren vorgesehen. Dazu werden, neben der Herstellung und Entsorgung der Beläge, vor allem die Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen bei Büro- und Wohngebäuden im Hinblick auf eine Reduzierung des Energie- und Materialverbrauchs untersucht. Es wird dabei der Energie- und Materialverbrauch vom sanierungsbedürftigen Bauteil über den Rückbau bis zur Herstellung der fertigen Tragschicht für das Aufbringen der neuen Bekleidung betrachtet.

Die Systemgrenze schließt, wie in Abbildung 9-2 dargestellt, den vollständigen Lebenszyklus inklusive aller Instandsetzungsprozesse von sanierungsbedürftigen Wandbekleidungen oder Bodenbelägen einschließlich Herstellung und Entsorgung ein. Der Instandsetzungs- bzw. Erneuerungsprozess setzt sich aus dem Rückbau der auszutauschenden Schicht und dem notwendigen Aufbereiten der Tragschicht zusammen. Nicht betrachtet wird die Tragstruktur der Wände und Böden, die die Grundlage der aufgetragenen Beläge und Bekleidungen bildet, soweit diese im Rahmen der Instandsetzungsarbeiten erhalten bleibt.

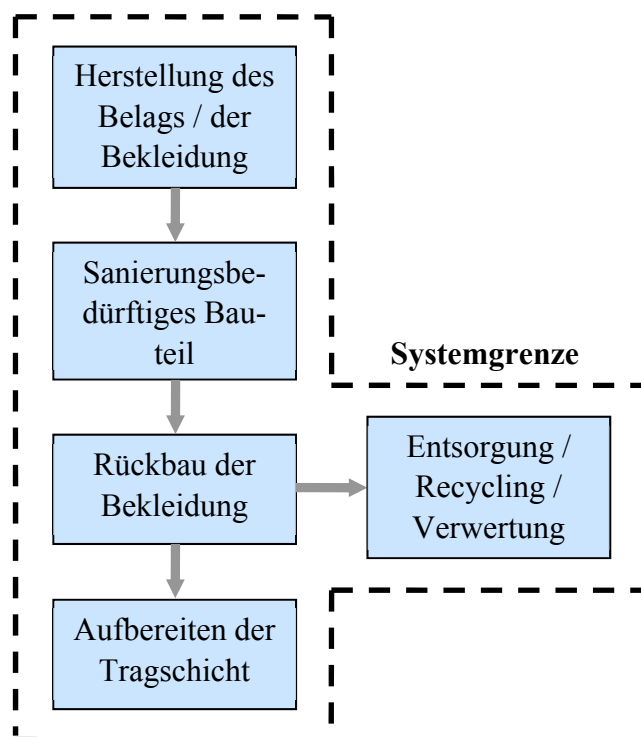


Abbildung 9-2: Darstellung der Systemgrenze

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden der Studie als funktionelle Einheit „m² instandgesetztes Bauteil“ zugrunde gelegt. Für die praxisnahe Durchführung werden Versuche im Maßstab 1:1 an Wänden mit den Abmessungen

2,0 m x 2,5 m (Breite x Höhe) und Fußböden mit den Abmessungen 2,0 m x 2,0 m (Breite x Länge) durchgeführt. Diese Abmessungen sind notwendig, um bei Wandbauteilen auch das Arbeiten über Kopf sowie in Bodennähe simulieren zu können. Durch die unterschiedlichen Arbeitspositionen sind differenzierte Auswirkungen auf die Qualität der Trennbarkeit und ein praxisnaher Durchschnittswert bei Energie- und Personalaufwand zu erwarten.

Die Modellierung der einzelnen Prozesse und Teilprodukte innerhalb der Umweltbewertung erfolgt mit Hilfe der „Ökobau.dat“ – Version 2010 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS (2010)). Die dort vorhandenen Datensätze werden regelmäßig gepflegt und gewährleisten eine hohe Datengenauigkeit und Aktualität. In dieser Datenbank nicht vorhandene Teilprodukte und Teilprozesse für das jeweilige Gesamtsystem Instandsetzungsmaßnahme wurden nach Angaben der jeweiligen Hersteller auf Basis der in der Datenbank vorliegenden Elementarflüsse und Basisprozesse möglichst detailgenau abgebildet. Die für die einzelnen Produktsysteme in die Bewertung einfließenden Eingangsgrößen, sowie die Zusammenstellung der Tragkonstruktionen und Beläge sind im Forschungsbericht von Graubner & Ritter (2010) ausführlich dargestellt.

Die definierten Umweltwirkungen werden anhand der Stoffströme nach Demontage und Wiedervorbereitung des jeweiligen Untergrunds getrennt ermittelt und zusammengestellt. Auf die Berücksichtigung von Transportwegen wird in der Betrachtung verzichtet. Es werden nur die reinen Baumaßnahmen an Wand bzw. Boden mit ihren direkten Auswirkungen sowie die Herstellung und mögliche Verwertung der abgebrochenen Baustoffe betrachtet. Für eine abschließende Bewertung, welche Wand- bzw. Fußbodenaufbauten eine besonders günstige Lösbarkeit und damit unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten eine hohe Instandsetzungsfreundlichkeit und Umbaufreundlichkeit aufweisen, wird u. a. auf die Bedeutungsfaktoren des DGNB-Systems für die Zertifizierung von Büro- und Verwaltungsbauten zurückgegriffen, um sowohl Umweltwirkungen als auch Energie- und Personalaufwand gemeinsam beurteilen zu können.

Abhängig vom gewählten Modernisierungsszenario ergeben sich für die Umweltwirkungen die folgenden Aussagen nach Tabelle 9-2 bis Tabelle 9-5. Die jeweiligen Einzelwirkungen sind im Anhang H dargestellt.

9.4 Ökologische Bewertung von hybriden Innenbauteilen

Tabelle 9-2: *Bewertete Umweltwirkungen von Wandbelägen unter Berücksichtigung der Lebensdauer*

Tragschicht	Fliese (kein Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (kein Austausch)
Gipskarton Leichtbauwand	mittel	sehr gering	mittel	sehr gering
Ziegel-MW mit Zementputz	mittel	sehr gering	hoch	sehr gering
Ziegel-MW mit Gipsputz	mittel	sehr gering	hoch	sehr gering
KS-MW mit Zementputz	gering	sehr gering	sehr hoch	sehr gering
KS-MW mit Gipsputz	mittel	sehr gering	hoch	sehr gering
Stb.-wand mit Zementputz	gering	sehr gering	hoch	sehr gering
Stb.-wand mit Gipsputz	gering	sehr gering	sehr hoch	sehr gering

Tabelle 9-3: *Bewertete Umweltwirkungen von Wandbelägen unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs aus Modernisierungsgründen*

Tragschicht	Fliese (1x Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (1x Austausch)
Gipskarton Leichtbauwand	mittel	sehr gering	gering	gering
Ziegel-MW mit Zementputz	hoch	sehr gering	mittel	gering
Ziegel-MW mit Gipsputz	mittel	sehr gering	mittel	gering
KS-MW mit Zementputz	hoch	sehr gering	hoch	gering
KS-MW mit Gipsputz	mittel	sehr gering	mittel	gering
Stb.-wand mit Zementputz	mittel	sehr gering	mittel	gering
Stb.-wand mit Gipsputz	gering	sehr gering	mittel	gering

Der Vergleich der beiden gewählten Szenarien liefert für die Umweltwirkungen von Wandbelägen nicht nur Unterschiede bei Fliesen und Holzverkleidung, bei denen der zu berücksichtigende Austausch die Werte verändert, sondern es ändert sich auch die Bewertung der Farbe, aufgrund der höheren Gesamtumweltwirkung beim Fliesenaustausch.

Es lässt sich festhalten, dass bei Wandbelägen das Anbringen und vor allem das spätere Ablösen von Fliesen erhebliche Umweltwirkungen verursachen, die im Vergleich zu Tapete oder Holzverkleidung deutlich herausstehen. Das Anbringen von Farbe scheint auf den ersten Blick ebenfalls sehr negativ, was aber durch das in der Praxis nicht übliche, sehr aufwändige Ablösen der Farbe im Rahmen der Versuchsreihe zu erklären ist.

Tabelle 9-4: *Bewertete Umweltwirkungen von Bodenbelägen unter Berücksichtigung der Lebensdauer*

Tragschicht	Fliese (kein Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (kein Austausch)
Zementestrich	sehr gering	hoch	hoch	gering
Anhydritestrich	sehr gering	hoch	hoch	gering
Gussasphaltestrich	sehr gering	hoch	hoch	gering
Trockenestrich	sehr gering	hoch	mittel	gering

Tabelle 9-5: *Bewertete Umweltwirkungen von Bodenbelägen unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs aus Modernisierungsgründen*

Tragschicht	Fliese (1x Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (1x Austausch)
Zementestrich	gering	hoch	hoch	sehr hoch
Anhydritestrich	gering	hoch	hoch	sehr hoch
Gussasphaltestrich	gering	hoch	hoch	hoch
Trockenestrich	gering	hoch	mittel	sehr hoch

Der Austausch von Natursteinbelag im Szenario 2 bedingt den größten Anstieg bei den Umweltwirkungen von Bodenbelägen. Während sich Laminat und Teppich überhaupt nicht verändern, sind die Umweltwirkungen beim Austausch von Fliesen zwar höher als ohne Austausch, jedoch sind sie noch erheblich günstiger als Natursteinbelag.

Im Bereich der Bodenbeläge sind die Fliesen als positives Beispiel zu nennen, da sie im Vergleich zu Laminat, Teppich und Natursteinbelag unter Berücksichtigung der Lebensdauer die günstigsten Umweltwirkungen abliefern.

9.5 Ökonomische Bewertung von hybriden Innenbauteilen

Die Berechnung von Herstellungs-, Instandsetzungs- und Beseitigungskosten bildet die Grundlage für die ökonomische Bewertung von hybriden Bauteilen. Üblicherweise sind bei einer Lebenszykluskostenbetrachtung die Prozesskosten entsprechend ihrer Herkunft und Zugehörigkeit nach den unterschiedlichen Kostenarten zu differenzieren. Für den reinen Vergleich unterschiedlicher Instandhaltungs- und Modernisierungsmaßnahmen an hybriden Innenbauteilen im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Gliederung von direkten und indirekten Kosten aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Die Kostenermittlung beruht auf der Multiplikation eines Mengenfaktors M mit den Einzelkosten gleicher Bezugseinheit EP . Die quantitative Bezugseinheit ist in Abhängigkeit der Einzelschicht und der damit verbundenen Leistung definiert. Der Mengenfaktor, d. h. die Menge an ein- und auszubauendem Material wird mit Hilfe der Stoffstromberechnung bestimmt, aufgegliedert nach den zugrunde liegenden Prozessen in Abhängigkeit der Baumaßnahme (Herstellung, Instandsetzung/Modernisierung, Abbruch).

$$K = M \cdot EP \quad (9.1)$$

Die Herstellungs-, Instandsetzungs- und Beseitigungskosten der Konstruktion werden durch die Erfassung und Zuordnung der Kosten Schicht für Schicht und der anschließenden Addition der einzelnen Prozesskosten ermittelt. Nicht lösbare oder bedingt lösbare Schichten werden beim Rückbau inklusive aller notwendigen Folgeprozesse zur Wiederherstellung der Tragschicht vollständig mengenmäßig erfasst und mit den entsprechenden Einzelkosten belegt. Bauteilschichten bzw. Materialien, die im Verbund ausgebaut und

entsorgt werden müssen, werden ebenfalls realitätsnah erfasst und entsprechend der aktuellen Entsorgungsrichtlinien bewertet.

Um unterschiedliche Konstruktionsalternativen durch Gegenüberstellung der Erst- und Folgekosten hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Konsequenzen bewerten und vergleichen zu können, bedient man sich der Methoden der Investitionsrechnung. Für die Investitionsrechnung existieren verschiedene Verfahren, von denen die Kapitalwertmethode am meisten akzeptiert und für die Ziele dieser Arbeit am besten geeignet ist, um alle über den Lebenszyklus der Baukonstruktion anfallenden Kosten zu einer monetären Zielgröße zusammenzufassen und die Wirtschaftlichkeit einer Alternative zu ermitteln. Für ausführlichere Darstellungen weiterer Verfahren und deren Grundlagen wird z. B. auf Thommen & Achleitner (1998) verwiesen. Bei der Kapitalwertmethode werden alle Aufwendungen A eines Betrachtungszeitraums mit einem einheitlichen Zinssatz – dem so genannten Kalkulationszinssatz i – auf den Zeitpunkt t_0 abgezinst. Die Summe aller verzinnten Aufwendungen ist der Kapitalwert KW , der das Entscheidungskriterium darstellt. Der Kalkulationszins ist der unter Annahme eines vollkommenen Kapitalmarkts angenommene Zinssatz, zu dem finanzielle Mittel in beliebiger Höhe angelegt oder aufgenommen werden können. Die mathematische Formel zur Berechnung des Kapitalwerts bei Abzinsung aller Zahlungen enthält Gleichung (9.2).

$$KW = \sum_{t=0}^{t_{\max}} \frac{A}{(1+i)^t} \quad (9.2)$$

Somit ergibt sich der jeweilige Kapitalwert für den Vergleich hybrider Innenbauteile über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ($0 \leq t \leq t_{\max}$) inklusive möglicher Liquidationserlöse am Ende (L_{50}) – bezogen auf den Investitionszeitpunkt t_0 und unter Annahme eines einheitlichen Kalkulationszinssatzes i – nach der Formel (9.3). Mögliche Liquidationserlöse am Ende werden durch die Restlebensdauer des Bauteils am Ende des Bezugszeitraums bestimmt, die sich als linearer Abschlag von den Herstellkosten berechnet.

$$KW = \sum_{t=0}^{50} \frac{A}{(1+i)^t} = -I_0 + \sum_{t=1}^{50} \frac{A}{(1+i)^t} + \frac{L_{50}}{(1+i)^{50}} \quad (9.3)$$

Die Berechnung des Kapitalwerts nach Gleichung (9.3) basiert auf den folgenden Annahmen:

- Isolierbarkeit und Prognostizierbarkeit der Aufwendungen (A , I_0) und der Restlebensdauer L_{50} sowie Zurechenbarkeit von Zahlungen zu einem bestimmten Zeitpunkt.
- Aufwendungen A erfolgen zum Ende der jeweiligen Periode (t).

- Der Liquidationserlös L_{50} erfolgt zum Ende des Betrachtungszeitraums ($t_{max} = 50$ Jahre). Er berechnet sich linear aus der Restlebensdauer. Verkaufserlöse von ausgetauschten Bauteilen (z.B. Schrottwert) werden nicht berücksichtigt.
- Der Kalkulationszinssatz i ist über alle Perioden gleich.
- Die Investitions- bzw. Anschaffungszahlung erfolgt zu Beginn der ersten Periode (t_0), d. h. die Investitionskosten werden zum Zeitpunkt t_0 und nicht über Zinszahlungen in den entsprechenden Perioden in Ansatz gebracht.
- Steuern werden vernachlässigt.

Des Weiteren wird bei diesem Ansatz unterstellt, dass Kosten und Kostenparameter (z. B. Löhne, Preise) sowie die Kapitalkosten (Zinsen) gleichermaßen von der Geldentwertung g betroffen sind, die im weiteren Verlauf der somit nominalen Berechnung mit einfließt. In den Gleichungen (9.4) und (9.5) werden die mathematischen Zusammenhänge zwischen realen (r) und nominalen (n) Größen für Aufwendungen A und den Kalkulationszinssatz i dargestellt.

$$A_n = A_r \cdot (1 + g_z) \quad (9.4)$$

$$i_n = (1 + i_r) \cdot (1 + g_i) - 1 \quad (9.5)$$

Zur Berücksichtigung der Inflation lässt sich Gleichung (9.3) zur Berechnung des Kapitalwerts wie folgt modifizieren, wobei im weiteren Verlauf auf die Berücksichtigung unterschiedlicher Inflationsraten verzichtet wird.

$$KW = \sum_{t=0}^{50} \frac{A_{n,t}}{(1 + i_n)^t} = -I_0 + \sum_{t=1}^{50} \frac{A_{r,t} \cdot (1 + g_z)^t}{(1 + i_r)^t \cdot (1 + g_i)^t} + \frac{L_{r,50} \cdot (1 + g_L)^{50}}{(1 + i_r)^{50} \cdot (1 + g_i)^{50}} \quad (9.6)$$

Die Kapitalwertmethode stellt ein Modell zur Vereinfachung der Realität dar, um die wirtschaftlichen Aspekte einer Investition über den Betrachtungszeitraum abzubilden. Bei der Gegenüberstellung unterschiedlicher Alternativen ist zunächst die Variante die vorteilhaftere, die den größeren Kapitalwert (geringere Kosten) gemäß Gleichung (9.6) aufweist. In der folgenden Tabelle 9-6 und Tabelle 9-7 sind die nach BKI Baukosten 2010 zusammengestellten Kapitalwerte für den Vergleich unterschiedlicher Wandbeläge auf verschiedenen Tragstrukturen dargestellt.

9.5 Ökonomische Bewertung von hybriden Innenbauteilen

Tabelle 9-6: *Geschätzte Kapitalwerte [€/m²] von Wandbelägen unter Berücksichtigung der Lebensdauer*

Tragschicht	Fliese (kein Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (kein Austausch)
Gipskarton Leichtbauwand	-65,00	-31,64	-33,92	-157,82
Ziegel-MW mit Zementputz	-65,00	-31,64	-33,92	-157,82
Ziegel-MW mit Gipsputz	-65,00	-31,64	-33,92	-157,82
KS-MW mit Zementputz	-65,00	-31,64	-33,92	-157,82
KS-MW mit Gipsputz	-65,00	-31,64	-33,92	-157,82
Stb.-wand mit Zementputz	-65,00	-31,64	-33,92	-157,82
Stb.-wand mit Gipsputz	-65,00	-31,64	-33,92	-157,82

Tabelle 9-7: *Geschätzte Kapitalwerte [€/m²] von Wandbelägen unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs aus Modernisierungsgründen nach 25 Jahren*

Tragschicht	Fliese (1x Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (1x Austausch)
Gipskarton Leichtbauwand	-137,65	-31,64	-33,92	-237,39
Ziegel-MW mit Zementputz	-111,44	-31,64	-33,92	-237,39
Ziegel-MW mit Gipsputz	-111,44	-31,64	-33,92	-237,39
KS-MW mit Zementputz	-111,44	-31,64	-33,92	-237,39
KS-MW mit Gipsputz	-111,44	-31,64	-33,92	-237,39
Stb.-wand mit Zementputz	-111,44	-31,64	-33,92	-237,39
Stb.-wand mit Gipsputz	-111,44	-31,64	-33,92	-237,39

Während sich in Tabelle 9-6 keine Unterschiede zwischen den einzelnen Tragstrukturen ergeben, da Fliese und Holzverkleidung überhaupt nicht ausgetauscht werden und der Austausch von Tapete und Farbe keine Auswirkungen auf die Tragstruktur verursacht, ist in Tabelle 9-7 der Austausch von Fliesen auf einer Gipskarton Leichtbauwand besonders zu erwähnen, da das Ablösen der Fliesen nicht ohne Zerstörung der Gipskartonwandbauplatten möglich war. Weitere Unterschiede in der Tragstruktur sind nicht zu erkennen. Die Berücksichtigung eines zusätzlichen Austauschs aus Modernisierungsgründen bei Fliesen und Holzverkleidung führt zu einer weiteren Verteuerung dieser beiden Beläge, die somit um ein Vielfaches teurer werden als Tapete oder Farbe.

Der Vergleich der Kapitalwerte unterschiedlicher Bodenbeläge auf verschiedenen Estricharten ist in Tabelle 9-8 und Tabelle 9-9 dargestellt. Unterschiede zwischen den Estricharten sind nur beim Trockenestrich festzustellen, da dieser beim Ablösen von Fliesen, Laminat und Natursteinbelag vollständig ausgetauscht werden musste. Für den Fall des rein technischen Vergleichs anhand der einzelnen Lebensdauern ist der Fliesenbelag am günstigsten, vor Natursteinbelag und Laminat. Der textile Bodenbelag schneidet aufgrund der kurzen Lebensdauer am schlechtesten ab, obwohl die Herstellung am günstigsten ist.

Tabelle 9-8: *Geschätzte Kapitalwerte [€/m²] von Bodenbelägen unter Berücksichtigung der Lebensdauer*

Tragschicht	Fliese (kein Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (kein Austausch)
Zementestrich	-59,55	-167,25	-209,61	-138,41
Anhydritestrich	-59,55	-167,25	-209,61	-138,41
Gussasphaltestrich	-59,55	-167,25	-209,61	-138,41
Trockenestrich	-59,55	-253,15	-209,61	-138,41

Tabelle 9-9: *Geschätzte Kapitalwerte [€/m²] von Bodenbelägen unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs aus Modernisierungsgründen nach 25 Jahren*

Tragschicht	Fliese (1x Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (1x Austausch)
Zementestrich	-113,02	-167,25	-209,61	-242,04
Anhydritestrich	-113,02	-167,25	-209,61	-242,04
Gussasphaltestrich	-113,02	-167,25	-209,61	-242,04
Trockenestrich	-138,38	-253,15	-209,61	-267,40

Durch die Berücksichtigung eines zusätzlichen Austauschs aus Modernisierungsgründen bei Fliesen- und Natursteinbelägen erhöhen sich die Kapitalwerte erheblich, so dass der Natursteinbelag am schlechtesten bewertet wird. Fliesen bleiben trotz Modernisierungsaustausch weiterhin am günstigsten, so dass der Einsatz von Fliesen als Bodenbelag deutlich besser zu bewerten ist als der Einsatz als Wandverkleidung.

9.6 Zusammenfassung

Kapitel 9 liefert einen Exkurs zum Thema Lebenszyklusanalyse, bei dem die neu ermittelten Referenzwerte für die mittleren technischen Lebensdauern eine aktualisierte Datengrundlage bilden, die zu einer Verbesserung der Aussagekraft von Lebenszyklusbetrachtungen beiträgt. Die beschriebene Verwendung der Daten im Rahmen der Lebenszyklusanalyse von hybriden Innenbauteilen kann nur einen kleinen Einblick in das weite Feld der Ökobilanzierung bieten, jedoch ist die Untersuchung der Lösbarkeit unterschiedlicher Materialsichten in Verbundbauteilen ein wichtiger Aspekt, der sich u. a. auf die Lebensdauer von nicht oder nur bedingt lösbaren Schichten auswirken kann. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einsatz von Trockenestrich unter geklebten Bodenbelägen zu einer Verkürzung der Lebensdauer des Estrichs führt, da das Ablösen der Beläge nicht ohne Zerstörung des Trockenestrichs möglich ist. Ähnliche Schwierigkeiten können beim Ablösen der Fliesen von Gipskartonwandbauplatten auftreten, wobei die Lebensdauer dieser beiden Komponenten mit jeweils ca. 50 Jahren üblicherweise keine großen Einbußen der Restlebensdauer verursacht.

Die ökologische Bewertung von hybriden Wandaufbauten über den gesamten Lebenszyklus liefert vor allem für Elemente mit Fliesenbelag negative Ergebnisse, bei denen sowohl die Herstellung und das Anbringen, aber vor allem das spätere Ablösen und Entsorgen der Fliesen erhebliche Umweltwirkungen verursacht. Bei hybriden Fußbodenkonstruktionen hingegen, liefern Aufbauten mit Fliesenbelag die günstigsten Werte. Die Umweltwirkungen von geklebtem Laminat und Teppich liegen auch aufgrund der kurzen Lebensdauer dieser Schichten deutlich über denen von Fliesen.

Die ökonomische Bewertung der hybriden Innenbauteile über den Bezugszeitraum von 50 Jahren zeigt erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Bekleidungen. Während bei den Wandbelägen vor allem die Holzverkleidung, mit nahezu fünfmal höheren Kosten als Farbe oder Tapete, als negatives Beispiel zu nennen ist, muss bei den Bodenbelägen der textile Bodenbelag erwähnt werden, der durch seine kurze Lebensdauer mehr als die dreifachen Kosten eines Fliesenbelags verursacht. Als günstige Varianten sind die Tapeten als Wandverkleidung und die Fliesen als Bodenbelag zu nennen.

10 RESÜMEE UND AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Lebensdauerermittlung im Bauwesen. Das Wissen um die Lebenserwartung einer Konstruktion bzw. ihrer Bauteile ist sowohl für die Durchführung von Lebenszyklusanalysen als auch zur Planung von Instandsetzungsstrategien erforderlich. Bisher vorliegende Kataloge zur Lebensdauer von Bauteilen sind häufig veraltet und liefern nur in den seltensten Fällen Angaben zu den Randbedingungen, unter denen die Daten gewonnen wurden. Aussagen zu Einflussgrößen, welche die Lebensdauer der einzelnen Bauteile beeinflussen können, gibt es in der Regel nicht. Anhand einer umfangreichen Datenerhebung bei verschiedenen Expertengruppen werden Erfahrungswerte über die Lebensdauer von Bauteilen und Baustoffen sowie deren Einflussgrößen gesammelt, um unter Berücksichtigung aktueller Bauteilkataloge und Literatur zu Bauschäden, die wesentlichen Einflussgrößen auf die Lebensdauer von Bauteilen identifizieren und schließlich quantifizieren zu können. Der Einsatz von Bauteilen und Baustoffen nach vordergründig wirtschaftlichen Gesichtspunkten soll zukünftig im Sinne einer lebenszyklusgerechten Planung vermieden werden.

Zu Beginn der Arbeit erfolgt in Kapitel 2 zunächst ein kurzer Einblick in die Grundlagen der stochastischen Analyse von Bauteillebensdauern, die zum Verständnis der weiteren Untersuchungen und der daraus entwickelten Ansätze notwendig sind. Dabei werden die Modellierung von Zufallsvariablen und die Möglichkeiten der Anpassung von Verteilungen an vorhandene Datenmengen erläutert. Durch den Prozess des „Data Updating“ nach Bayes werden die stochastischen Momente anhand weiterer Basisdaten verbessert und einer Näherungslösung mit großer Stichprobe angenähert. Die Datenaktualisierung nach Bayes ist einer der wesentlichsten Schritte zur Schaffung einer zuverlässigen Datenbasis in dieser Arbeit.

Kapitel 3 enthält einen Abriss der Grundlagen zur Lebensdaueranalyse und Alterung von Bauteilen. Die Ausführungen beinhalten eine Darstellung der Lebenszyklusphasen mit notwendigen Definitionen und Abgrenzungen hinsichtlich der Lebensdauerplanung. Auf dieser Basis werden die aktuellen Forschungstätigkeiten im Bereich der Lebensdauerplanung strukturiert und zusammengefasst. Neben den Arbeiten zur Dauerhaftigkeit von Materialien und Bauteilen gehört die Instandhaltungsoptimierung und v. a. die Lebensdauer vorhersage zum untersuchten Themenkomplex. Im Anschluss an diese Zusammenstellung folgt eine kritische Diskussion der internationalen Normenreihe ISO 15686 als bauteilübergreifende Norm im Bereich der Lebensdauerplanung. Die einzelnen Teile der Norm werden erläutert und diskutiert. Im weiteren Verlauf werden die Begriffe Alterungsverhalten, Abnutzungsvorrat und Wertverlust durch verschiedene Modelle näher beschrieben, die für das Verständnis der weiteren Arbeit erforderlich sind. Es werden erste Ansätze der Lebensdauerprognose gezeigt, die auch in aktuellen Methoden der Lebensdauer-

schätzung noch verwendet werden. Die abschließend beschriebenen Grundlagen zur Gebäudeunterhaltung runden das Kapitel ab und geben einen Einblick in die verschiedenen Instandhaltungsstrategien.

Eine vertiefte Analyse verschiedener Modelle zur Lebensdauerermittlung in Kapitel 4 zeigt sowohl den aktuellen Stand der Prognoseverfahren in der Praxis als auch die theoretischen Ansätze in der Wissenschaft, auf denen die vorliegende Arbeit aufbaut. Neben der häufig angewandten Kennwertemethode und dem Verfahren nach Tomm, Rentmeister und Finke (1995), das die Grundlage der meisten anderen Methoden bildet, wird v. a. die Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 in diesem Kapitel erläutert. Auf der Basis von Referenzlebensdauern wird versucht, die tatsächlichen Umweltbedingungen einzelner Bauteile durch verschiedene Faktoren bei der Bestimmung der spezifischen Lebensdauer zu berücksichtigen. Leider fehlen in der Norm sowohl definierte Referenzbedingungen als auch Angaben zu Referenzlebensdauern sowie notwendige Hilfen zur Quantifizierung der verschiedenen Einflüsse. Trotzdem wird in dieser Arbeit die Grundidee der Faktorenmethode, auf der Basis von mittleren Lebensdauern eine objektspezifische Lebensdauer unter Berücksichtigung der vorhandenen Randbedingungen durch Zuschlags- und Abzugsfaktoren zu ermitteln, weiterverfolgt und als Basis des zu entwickelnden Modells verwendet.

Die Auswahl der zu untersuchenden Bauteile stellt einen Kompromiss zwischen Untersuchungsaufwand und Detaillierung dar. Kapitel 5 beschreibt das Auswahlverfahren der maßgebenden Bauteile sowie die Gliederung und den Grad der Detaillierung. Unter Berücksichtigung der Datenqualität nach DIN ISO 15686-8 (2008) erfolgt die Gliederung der Bauteile nach DIN 276-1 (2006) auf der Basis einer Literaturrecherche. Diesbezüglich wird ein Bewertungskatalog erstellt, mit dem unter Berücksichtigung der maßgebenden Einflussgrößen, die relevanten Bauteile zusammengestellt werden können. Nach Abwägung aller Einflussgrößen ergibt sich somit eine Liste von ca. 400 Bauteilen, die sich aus einzelnen Schichten, einfachen Bauelementen und hybriden Bauteilen zusammensetzt, die im weiteren Verlauf der Arbeit näher untersucht werden. Die abschließend beschriebene Modellierung von zusammengesetzten Bauteilen und deren Trennbarkeit im Fall von unterschiedlichen Lebensdauern der Einzelschichten runden das Kapitel ab.

Kapitel 6 befasst sich mit den möglichen Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Bauteilen. Es werden die Hintergründe sowie die möglichen Auswirkungen und Abhängigkeiten der Einflüsse untereinander dargestellt. Grundsätzlich kann zwischen Einflüssen auf das materielle Alterungsverhalten und Einflüssen auf die immaterielle Alterung eines Bauteils unterschieden werden. Basierend auf den Faktorkategorien nach DIN ISO 15686 werden die Einflussfaktoren der materiellen Alterung zunächst in die Klassen Komponentenqualität, Entwurfsqualität, Ausführungsqualität, innenräumliche Umgebungsbedingungen, außenräumliche Umgebungsbedingungen, Gebrauchskonditionen und Instandhal-

tungsniveau eingeteilt und die jeweiligen Einflüsse bzw. Auswirkungen als Subfaktoren beschrieben. Immaterielle Einflüsse, wie z. B. modische Obsoleszenz oder technische Überalterung, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, da ihre Auswirkungen keinen direkten Bezug zur technischen Lebensdauer besitzen, so dass die Vorhersage der tatsächlichen Verweildauer von Bauteilen in einem Gebäude unter Berücksichtigung der immateriellen Einflüsse nicht möglich ist. Den Abschluss des 6. Kapitels bildet ein Einblick in das materialspezifische Alterungsverhalten um auch die Hintergründe der Wirkungsweise von Einflussfaktoren verstehen zu können. Für die wichtigsten Baustoffe, wie z.B. Beton, Holz, Glas oder Naturstein werden die wesentlichen Einflussgrößen zusammengefasst und mögliche Schadensrisiken analysiert.

Aufbauend auf den Vorarbeiten der vorherigen Kapitel wird in Kapitel 7 die Erweiterung der Datengrundlage durch praxisnahe Erfahrungswerte zu Lebensdauern und Einflussgrößen auf Basis von Expertenbefragungen diskutiert und näher erläutert. Anhand der nach Expertengruppen getrennt ermittelten Lebensdauerdatensätze und den zusätzlichen Angaben zur Bewertung der Einflussgrößen kann mit dem Verfahren des Datenupdates nach Bayes eine erhebliche Verbesserung der statistischen Parameter der Basisdaten erreicht werden. Bei diesem Verfahren zur Schätzung von Parametern werden die Lebensdauerdaten aus Literatur als Vorinformationen verwendet, die durch die Ergebnisse der einzelnen Expertengruppen schrittweise zugeschärft werden. Es zeigt sich, dass sowohl der Wert der mittleren technischen Lebensdauer als auch die Streuung der ursprünglichen Daten signifikant durch das Updaten verbessert wird. Die Bewertung der Einflussgrößen wird ebenfalls mit dem Verfahren des Datenupdates verbessert, wobei diesbezüglich die Angaben der Hersteller als Vorinformationen verwendet werden, die anschließend durch die Einschätzungen von Sachverständigen, Dienstleistern und FM-Unternehmen verbessert werden. Der Grad der Verbesserung ist von der jeweiligen Streuung der Basisdaten abhängig, so dass kein globaler Faktor über alle Daten angegeben werden kann, wobei eine durchschnittliche Verbesserung des Variationskoeffizienten von über 10% erreicht wird.

Die bisherigen Ansätze zur Vorhersage der Lebensdauer von Bauteilen wurden bereits in Kapitel 4 hinreichend diskutiert. Das Modell der Faktoren-Methode aus DIN ISO 15686 hat sich dabei grundsätzlich als sinnvoll erwiesen, so dass sich das in dieser Arbeit vorgeschlagene Modell an dieser Methode orientiert. Neben der Referenzlebensdauer TLD_{ref} , die sich aus Datenerhebung und Literaturrecherche berechnen lässt, wird die objektspezifische Lebensdauer TLD_{Ew} v. a. durch die verschiedenen Einflussfaktoren nach Kapitel 6 beeinflusst. Die dort beschriebenen Subfaktoren werden für die weitere Verwendung in der Praxis mit jeweils einem Szenario für positive, negative und neutrale Einflüsse belegt. Durch die Ergebnisse der Expertenbefragungen kann über die Gleichungen (8.3) und (8.4) eine Quantifizierung der Einflüsse erreicht werden, so dass im neuen Prognosemodell sowohl alle 33 Subfaktoren einzeln, als auch die Einflussgrößen auf Faktorebene (A-G)

bewertet werden können. Die spezifische Lebensdauer eines Bauteils in einem konkreten Umfeld (TLD_{Ew}) lässt sich schließlich über Gleichung (8.5) berechnen. Die eigentliche Bewertung der Einflussgrößen obliegt dem Anwender, der sich bei seiner Auswahl an den Szenarien nach Tabelle 8-1 bis Tabelle 8-7 orientieren kann. Die Erweiterung des entwickelten Modells durch die Abbildung unbekannter Faktoren als Zufallsgrößen mit entsprechender Wahrscheinlichkeitsverteilung führt zu einer Vereinfachung des Modells in der Praxis. Anhand einer qualitativen, anwendungsbezogenen Bewertung der Einflussgrößen in fünf Stufen nach Tabelle 8-23 lässt sich die spezifische Lebensdauer je nach Kenntnis der Umgebungsbedingungen mit entsprechender Eintrittswahrscheinlichkeit vorhersagen. Für die Verwendung der Daten im Bereich Lebenszyklusanalyse wird eine Bauteilliste mit mittleren technischen Lebensdauern auf stochastischer Basis zusammengestellt, die in Verbindung mit entsprechenden 5%- und 95%-Fraktilwerten die Aussage-sicherheit der Basisdaten für Lebenszyklusbetrachtungen erhöht. Nach der anschließenden Validierung des entwickelten Modells anhand von tatsächlichen Bauteillebensdauern konkreter Objekte wird ein Modellvergleich mit Kennwertemethode und Faktorenmethode nach DIN ISO 15686 anhand weiterer Objekte aus der Praxis durchgeführt. Die abschließende Sensitivitätsanalyse rundet die Modellentwicklung ab und zeigt die möglichen Auswirkungen der einzelnen Faktoren auf die spezifische Lebensdauer.

Kapitel 9 liefert abschließend einen Exkurs zum Thema Lebenszyklusanalyse. Die beschriebene Verwendung der Daten im Rahmen der Lebenszyklusanalyse von hybriden Innenbauteilen kann nur einen kleinen Einblick in das weite Feld der Ökobilanzierung bieten, jedoch ist die Untersuchung der Lösbarkeit unterschiedlicher Materialschichten in Verbundbauteilen ein wichtiger Aspekt, der sich u. a. auf die Lebensdauer von nicht oder nur bedingt lösbaren Schichten auswirken kann. Die ökologische Bewertung von hybriden Wandaufbauten über den gesamten Lebenszyklus liefert vor allem für Elemente mit Fliesenbelag im Vergleich zu Tapete, Farbe oder Holzbekleidung negative Ergebnisse, bei denen sowohl die Herstellung und das Anbringen, aber vor allem das spätere Ablösen und Entsorgen der Fliesen erhebliche Umweltwirkungen verursacht. Bei hybriden Fußbodenkonstruktionen hingegen, liefern Aufbauten mit Fliesenbelag die günstigsten Werte. Die Umweltwirkungen von geklebtem Laminat und Teppich liegen v. a. aufgrund ihrer kürzeren Lebensdauer deutlich über denen von Fliesen.

Bei der ökonomischen Bewertung der hybriden Innenbauteile über den Bezugszeitraum von 50 Jahren zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Bekleidungen. Während bei den Wandbelägen vor allem die Holzverkleidung, mit nahezu fünfmal höheren Kosten als Farbe oder Tapete, als negatives Beispiel zu nennen ist, muss bei den Bodenbelägen der textile Bodenbelag erwähnt werden, der durch seine kurze Lebensdauer mehr als die dreifachen Kosten eines Fliesenbelags verursacht. Als günstige Varianten sind die Tapeten bei der Wandverkleidung und die Fliesen als Bodenbelag zu nennen.

Somit können bereits bei der Planung von Gebäuden die entsprechenden Bauprodukte und Bauteile derart aufeinander abgestimmt werden, dass die Stoff- und Energieflüsse reduziert und die Lebenszykluskosten minimiert werden.

Die hier vorliegende Arbeit zeigt deutlich, dass die Bestimmung der jeweils maßgeblichen Faktoren und deren Einflussgewichtung ein enormes Fachwissen bezüglich des Alterungsverhaltens auf Bauteil- oder Materialebene voraussetzt, das dem Anwender des Verfahrens nur in den seltensten Fällen vorliegt. Da die Wahl und die Gewichtung der Einflussfaktoren einen sehr großen Einfluss auf die berechnete Lebensdauer haben, sollte der Entscheidungsspielraum des Anwenders hierbei möglichst stark eingegrenzt sein. Es sollten möglichst für alle Subfaktoren Indikatoren definiert werden, die anhand von konkreten Messkriterien Grenzwerte festlegen, die von allen potenziellen Anwendern gleichermaßen verstanden werden und lediglich die Einordnung in lebensdauerverlängernd, durchschnittlich oder lebensdauerverkürzend vom Anwender verlangt. Die von Bahr & Lennerts (2010) vorgeschlagenen Arbeitshilfen in Form von Expertendatenblättern sind sicherlich ein guter Weg, um möglichst eindeutige und konkrete Vorgaben zur Wahl der Faktoren und der Ausprägung der Gewichtung zu machen.

Darüber hinaus sollte es sich die aktuell sehr intensive Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der Referenzlebensdauern zum Ziel machen, nicht nur die Lebensdauerkataloge aktuell und möglichst umfangreich zu gestalten, sondern auch Referenzbedingungen festlegen, die einen Abgleich der objektspezifischen Einsatzrandbedingungen mit den Referenzbedingungen erlauben. Dies wäre ein erster Schritt zur Erhöhung der Anwendungssicherheit und eine gute Basis für weitere Forschungstätigkeiten im Bereich der Einflussquantifizierung.

Zusammenfassend stellt diese Arbeit ein vereinfachtes Prognosemodell zur wirklichkeitsnahen Schätzung von Bauteillebensdauern auf der Basis von Expertenbefragungen zur Verfügung. Es ermöglicht die Berücksichtigung von objektspezifischen Randbedingungen, die sich je nach Ausprägung auf die technische Lebensdauer des untersuchten Bauteils auswirken. Der oft eher zufällige Einsatz von Bauteilen und Baustoffen nach vordergründig wirtschaftlichen Gesichtspunkten sollte zukünftig im Sinne der Nachhaltigkeit und einer langfristigen Wirtschaftlichkeit, die mit geringeren Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten einher geht, vermieden werden.

11 LITERATURVERZEICHNIS

Fachliteratur

Aarseth, L. I. & Hovde, P. J. (1999): A stochastic approach to the factor method for estimating service life. In: 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components, 30.05.-03.06.1999, Vancouver, Canada, National Research Council of Canada, Ottawa, Vol. 2, S. 1247–1256.

Alcalde Rasch, A. (2000): Erfolgspotential Instandhaltung: Theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements, Erich Schmidt Verlag, Berlin

Ament, C. (2010): QM in der Gebrauchsphase, Skript zur Vorlesung Grundlagen der Qualitätswissenschaft, Fachgebiet Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik der Universität Bremen, Bremen

Ansell, A., Racutanu, G., Sundquist, H. (2002): A Markov approach in estimating the service life of bridge elements in Sweden, 9DBMC, paper142, Brisbane, Australia

Aurnhammer, K. G. (2008): Schäden an Estrichen. Band 15 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart

Bahr, C. (2008): Realdatenanalyse zum Instandhaltungsaufwand öffentlicher Hochbauten – Ein Beitrag zur Budgetierung. Dissertation an der Fakultät Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana, Karlsruhe

Bahr, C., Lennerts, K. (2010): Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen. Endbericht aus dem Forschungsprogramm „Zukunft Bau“, im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, Berlin

Bayer Cropscience (2011): Webpräsenz der Firma Bayer AG –Cropscience, Hagel-schlagrisikokarte nach Schadenssätzen, Monheim

BBSR (2008): Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen der Kostengruppen 300, 400 und 500 nach DIN 276-1, Datenbank Zwischenauswertung. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin

BBSR (2009): Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen der Kostengruppen 300, 400 und 500 nach DIN 276-1, Entwurf der Endfassung. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin

Benjamin, J. R. & Cornell, C. A. (1970): Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill Book Company, New York

- BKI (2009):** BKI Baukosten 2009 – Teil 2: Statistische Kostenkennwerte für Bauteile, Hrsg.: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Verlagsgesellschaft Müller, Köln
- BKI (2010):** BKI Baukosten 2010 – Teil 2: Statistische Kostenkennwerte für Bauelemente, Hrsg.: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Verlagsgesellschaft Müller, Köln
- BMVBS (2001):** Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin
- BMVBS (2006):** Richtlinien für die Ermittlung der Verkehrswerte von Grundstücken (Wertermittlungsrichtlinien – WertR 2006); Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin
- BMVBS (2009):** Lebenszyklus von Gebäuden. www.kompetenzzentrum-bauen.de, Webpräsenz des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin
- BMVBS (2010):** Baustoffdatenbank „Ökobau.dat“. www.nachhaltigesbauen.de, Webpräsenz des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin
- Box, G. E. P. & Tiao, G. C. (1992):** Bayesian Inference in Statistical Analysis. A Wiley-Interscience Publication, New York
- BTE (2008):** Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte; Webpräsenz des Bundes technischer Experten e. V., Agethen, U., Frahm, K.-J., Renz, K., Thees, E. P., Essen
- Caccavelli, D. & Gugerli, H. (2002):** TOBUS – a European diagnosis and decision-making tool for office building upgrading, In: Energy and Buildings Nr. 34, Elsevier, Oxford UK, 2002
- Caccavelli, D. (2004):** INVESTIMMO – A decision-making tool for long-term efficient investment strategies in housing maintenance and refurbishment, Final Technical Report, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Département Développement Durable, Paris, 2004
- Christen, K. & Meyer-Meierling, P. (1999):** Optimierung von Instandsetzungszyklen und deren Finanzierung bei Wohnbauten, Forschungsbericht, vdf Hochschulverlag AG, ETHZ, Zürich
- CIB-Publication 294 (2004):** Performance Based Methods for Service Life Prediction – State of the Art Reports, CIB Report Publication 294, Rotterdam
- CIB-Publication 295 (2004):** Guide and Bibliography to service life and durability research for buildings and components, CIB Report Publication 295, Rotterdam

- CIB-Publication 1123 (2001):** Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Building Materials and Components, CIB Report Publication 1123, Rotterdam
- Cziesielski, E. & Vogdt, F. U. (2007):** Schäden an Wärmedämmverbundsystemen. Band 20 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart
- Dach (2003):** Regeln für Dachdeckungen; Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks e. V. (Hrsg.); Köln
- Daniotti, B. (2010):** Accelerated laboratory test procedures and correlation between laboratory tests and service life data. In CIB Report 331 - Test Methods for Service Life Prediction, Rotterdam, 2010
- Devore, J. L. (2001):** Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, Brooks/Cole-Thomson Learning, Belmont
- DGNB e.V. (Hrsg.) (2009):** Handbuch Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude, Version 2009, Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen e.V., Stuttgart
- Enright, M.P., Frangopol, D.M. (1998):** Service-life prediction of deteriorating concrete bridges, Journal of Structural engineering, Vol. 124, No. 3, pp. 309-317
- Faber, M. H. (2005):** Risk and Safety in Civil Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, ETHZ, Zürich
- Gehlen, C. (2000):** Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, D 82, RWTH, Aachen
- Graubner, C.-A. & Ritter, F. (2010):** Analyse der Trennbarkeit hybrider Innenbauteile bei Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen – Erstellung einer praxisnahen Datenbank für die Nachhaltigkeitsbeurteilung, Forschungsbericht F03-9-2010, Institut für Massivbau, TUD, Darmstadt
- Graubner, C.-A. & Ritter, F. (2010b):** Lebensdauer von Bauelementen der Kostengruppen nach DIN 276, Forschungsbericht F03-8-2010, Institut für Massivbau, TUD, Darmstadt, unveröffentlicht
- Grünberg, J. (2004):** Grundlagen der Tragwerksplanung – Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln für den konstruktiven Ingenieurbau, Erläuterungen zu DIN 1055-100, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.), Beuth-Verlag, Berlin Wien Zürich
- Gumbel, E. J. (1958):** Statistics of Extremes, Columbia Univ. Press, New York
- Hasofer, A. M. & Lind, N. C. (1974):** An Exact and Invariant First Order Reliability Format, Journal of Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 100, No. EM1

Hellerforth, M. (2001): Facility Management – Immobilien optimal verwalten. Haufe Mediengruppe, Freiburg Berlin München Zürich

Herzog, K. (2005): Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen, Heft 10, Dissertation des Fachbereichs Bauingenieurwesen und Geodäsie, Institut für Massivbau, TUD, Darmstadt

HEV (1994): Lebensdauer von Wohnungseinrichtungen, Schweizer Hauseigentümerverband, Bern, 1994

Hirschberger, H. (1998): Senkung der Baufolgekosten durch systematische und zustandsabhängige Erhaltung von Gebäuden und langzeitkostenoptimale Baustoffwahl. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart

Höckmann, C. (2011): Webpräsenz von Christina Höckmann, Trier, Mittlere Sonnenscheindauer im Jahr, aus FB Physik, Uni Karlsruhe, Karlsruhe

IEMB (1998): Sanierungsgrundlagen Plattenbau, Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. der TU Berlin, Hrsg.: IRB Verlag, Stuttgart

IEMB (2006): Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten. Info-Blatt 4.2, Hrsg.: Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. der TU Berlin im Auftrag des Bundesamts für Bauwesen und Raumordnung, Bonn

IEMB (2006b): Gebäudedokumentation. Info-Blatt 9.1, Hrsg.: Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. der TU Berlin im Auftrag des Bundesamts für Bauwesen und Raumordnung, Bonn

IEMB (2009): Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten. Info-Blatt 4.2, Hrsg.: Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. der TU Berlin im Auftrag des Bundesamts für Bauwesen und Raumordnung, Berlin

IFB (1986): Vergleich des Einflusses unterschiedlicher Konstruktionen, Baustoffe und Ausstattungen bei sonst gleichen Gebäuden auf die Herstellungs- und Baunutzungskosten; Bauforschungsbericht F 2072 des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn

IFB (2004): Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau; Forschungsbericht F 2464, Institut für Bauforschung e.V., Hannover

IFBOR (2007): Technische Lebensdauern - Synopse; www.ifbor.eu, Nürtingen-Geislingen University

IP BAU (1994): Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltungskosten, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern

- JCSS (2003):** Probabilistic Model Code, Joint Committee on Structural Safety, www.jcss.ethz.ch
- Jernberg, P., Lacasse, M. A. (2004):** Part I – C.2 Service life and durability research. Reliability based service life prediction. in Service life and durability research for buildings and components, Rotterdam
- Kabrede, H. A., Spigatis, R. (2003):** Abdichten erdberührter Bauteile, Gebäudeinstandsetzung, Band 1, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- Kaempfer, H.W., Berndt, M., Voiglaender, G. (2002):** Estimation of residual service life for existing sewerage systems, 9DBMC, paper 164, Brisbane, Australia
- Kleiber, W. (1997):** WertR 76/96: Sammlung amtlicher Texte zur Wertermittlung von Grundstücken unter Berücksichtigung der WertV 98, BauGB 98 und Normalherstellungskosten 95. 6.Aufl., Bundesanzeiger Verlags-GmbH, Köln
- Kleiber, W. (2010):** WertR 06: Sammlung amtlicher Texte zur Ermittlung des Verkehrswerts von Grundstücken mit Normalherstellungskosten. 10.Aufl., Bundesanzeiger Verlags-GmbH, Köln
- Klein, W. (1994):** Schäden an Fenstern. Band 6 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart
- Klingenberger, J. (2007):** Ein Beitrag zur systematischen Instandhaltung von Gebäuden. Dissertation im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, Institut für Baubetrieb, TUD, Darmstadt
- Krug, K.-E. (1985):** Wirtschaftliche Instandhaltung von Wohngebäuden durch methodische Inspektion und Instandsetzungsplanung. TU Braunschweig, Schriftenreihe des Instituts für Bauwirtschaft und Baubetrieb, Heft 16, Braunschweig
- Küffner, P. & Lummertzheim, O. (2000):** Schäden an Glasfassaden und -dächern. Band 21 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart
- Kühlmeyer, M. (2001):** Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure, Springer-Verlag, Berlin
- Lair, B., Le Teno, J.F., Boissier, D. (1999):** Durability assessment of building systems, 8DBMC, pp. 1299-1308, Vancouver, Canada
- Leira, J., Lingard, J., Nesje, A., Sind, E., Saegrov, S. (1999):** Degradation analysis by statistical methods, 8DBMC, pp. 1436-1446, Vancouver, Canada
- Linß, E., Müller, A. (2009):** Prognoseverfahren, Skript zur Vorlesung Stoffhaushalt am Fachgebiet Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung der Bauhaus-Universität Weimar, Weimar

LVÖ (2006): Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile – 2006, 3.Aufl., ISBN-10: 3-200-00690-0, ISBN-13: 978-3-200-00690-4

Maydl, P. & Schulter, D. (2010): Nachhaltigkeit massiv AP 02 – Lebensdauer von Bauteilen und Bauprodukten, Forschungsbericht am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TUG, Graz

Moser, K. (1999): Towards the practical evaluation of service life – Illustrative application of the probabilistic approach, 8DBMC, pp. 1319-1329, Vancouver, Canada

Oswald, R. & Rojahn, H. (2005): Schäden an genutzten Flachdächern. Band 35 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart

Oswald, R. (2009): Aachener Bausachverständigentage 2008. Bauteilalterung - Bauteilschädigung – Typische Schädigungsprozesse und Schutzmaßnahmen. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden

Punkki, J. (2006): Dauerhaftigkeit zeitgemäßer Betonbauwerke, in: BFT International (2006) Heft 11, S. 34 – 42, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh

Rackwitz, R. & Peintinger, B.(1981): Ein wirklichkeitsnahes stochastisches Modell mit unsicheren Parametern und Anwendung auf die Stabilitätsuntersuchungen von Böschungen, Bauingenieur 56, Springer Verlag, Berlin

Rackwitz, R. (1982): Predictive distribution of strength under control, Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke (SFB 96), Heft 66, TUM, München

Rackwitz, R. (2000): The Basis of Code Making and Reliability Verification, Structural Safety, Vol. 22, No. 1

Rackwitz, R. (2004): Optimal and Acceptable Technical Facilities Involving Risks, Risk Analysis, Vol. 24, No. 3

Raiffa, H. & Schlaifer, R. (1961): Applied Statistical Decision Theory, Harvard University Press, Cambridge University Press, Cambridge (Mass.)

Rapp, A. O. & Sudhoff, B. (2003): Schäden an Holzfußböden. Band 29 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart

RCP (2004): STRUREL, A Structural Reliability Analysis Program System, RCP GmbH, München

Reiche, K. (2001): Nachhaltigkeitsanalyse demontagegerechter Baukonstruktionen. Dissertation des Fachbereichs Bauingenieurwesen und Geodäsie, Institut für Massivbau, TUD, Darmstadt

Rudolphi, A. (2005): Instrumente zur qualitätsabhängigen Abschätzung der Dauerhaftigkeit von Materialien und Konstruktionen. Forschungsbericht im Auftrag des Bundes-

ministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, bearbeitet durch Gesellschaft für ökologische Bautechnik Berlin mbH, Berlin

Ruhnau, R. (1992): Schäden an Außenwandfugen im Beton- und Mauerwerksbau. Band 1 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart

Ryll, F. (2008): Gestaltung einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie auf der Grundlage einer erfahrungsbasierten Bewertung von Abnutzungsvorräten in technischen Anlagen. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart

Sarja, A. et al. (2005): European guide for life time design and management of civil infrastructures and buildings. Lifetime Engineering of Buildings and Civil Infrastructures

Sauder, M. & Schloenbach, R. (1995): Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein. Band 11 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart

Satzger, H. (1998): Schäden an Deckenbekleidungen und abgehängten Decken. Band 18 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart

Scheewe, H.-J. (2001): Schäden an elastischen und textilen Bodenbelägen. Band 22 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart

Schiroslawski, W. (1982): Eigenschaften und Anwendungsbereiche von Instandhaltungsmethoden am Beispiel von landtechnischen Arbeitsmitteln, Dissertation, Universität Rostock

Schmitz, H. Krings, E., Dahlhaus, U., Meisel, U. (2004): Instandsetzung / Sanierung / Modernisierung / Umnutzung in Baukosten 2004, Hrsg.: Verlag für Wirtschaft und Verwaltung Hubert Wingen, Essen

Schneider, J. (1996): Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart

Schröder, J. (1992): Zustandsbewertung großer Gebäudebestände, Systembeschreibung und Rechenmodell, Zürich

Schuhmacher, R. (2001): Schäden an Türen und Toren. Band 23 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart

Schwaiger, B. (2002): Strukturelle und dynamische Modellierung von Gebäudebeständen. Dissertation, Fakultät für Architektur der Universität Karlsruhe (TH)

Schweizer Eidgenossenschaft (2003): Technische Weisung Beurteilung von Energiesystemen und Energiesparmassnahmen; Einführung/Programmbeschreibung und standardisierte Nutzungszeiten von Gebäuden/Bauteilen. Technische Vorgabe des Eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS, Bern

- Schweizer Mieterverband (2008):** Lebensdauertabelle. Webpräsenz des Schweizerischen Mieterinnen- und Mieterverbands, www.mieterverband.ch, Zürich
- SIA (1995):** Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten. SIA-Dokumentation D 0123, Zürich
- Siemes, T. Edvarden, C. (1999):** DuraCrete: Service life design for concrete structures, 8DBMC, pp. 1343-1356, Vancouver, Canada
- Simon, J. (1992):** WertR 1991. Wertermittlungsrichtlinien 1991. Textsammlung zur Wertermittlung von Grundstücken mit einer Einführung und ergänzenden Hinweisen für die neuen Länner, Verlag für Verwaltungspraxis, München
- Spaethe, G. (1987):** Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- Steinecke, V. (1979):** Das Lebensdauernetz, Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Stewart, M. G. & Melchers, R. (1997):** Probabilistic Risk Assessment of Engineering Systems, Chapman & Hall, London
- Stocker, H. (2010):** Einführung in die angewandte Ökonometrie, Skriptum des Fachgebiets Angewandte Ökonometrie, Universität Innsbruck
- STRATUS (2002):** Benutzerdokumentation STRATUS Gebäude 3.00 CH, Basler und Hofmann Ingenieure und Planer AG, Zürich
- Thienel, K.-Ch. (2008):** Werkstoffe I: Chemie und Eigenschaften metallischer Werkstoffe – Stahl und NE-Metalle, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr, München
- Thommen, J.-P. & Achleitner, A.-K. (1998):** Allgemeine Betriebswirtschaft, 2. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden
- Tomm, A.; Rentmeister, O.; Finke, H. (1995):** Geplante Instandhaltung: Ein Verfahren zur systematischen Instandhaltung von Gebäuden, Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung (LBB), Aachen
- Wiederstein, D. (2011):** Webpräsenz der Firma Wiederstein, aus Bärtels, Enzyklopädie der Gartengehölze, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Wienerberger (2008):** Kleine Bauphysikkunde – Grundwissen, Wienerberger Ziegelindustrie GmbH (Hrsg.), Hannover
- Wisy (2011):** Webpräsenz der Firma Wisy AG, Niederschlagskarte Deutschland des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach

Zimmermann, G. (2001): Schäden an Belägen und Bekleidungen mit Keramik- und Werksteinplatten. Band 25 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart

Zimmermann, G. (2006): Schäden an Dachdeckungen. Band 40 – Schadenfreies Bauen, Hrsg. Günther Zimmermann, IRB Verlag, Stuttgart

Technische Regelwerke

DIN 276-1 (2006): Kosten im Bauwesen – Teil 1 Hochbau, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN 1045-1 (2008): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN 1055-4 (2005): Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4 Windlasten, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN 1055-5 (2005): Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5 Schnee- und Eislast, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN 1055-100 (2001): Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100 Grundlagen der Tragwerksplanung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN 4108-3 (2002): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN 4149 (2005): Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN 18168-1 (2007): Gipsplatten-Deckenbekleidungen und Unterdecken – Teil 1: Anforderungen an die Ausführung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN 18168-2 (2008): Gipsplatten-Deckenbekleidungen und Unterdecken – Teil 2: Nachweis der Tragfähigkeit von Unterdecken und Abhängern aus Metall, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN 18960 (2008): Nutzungskosten im Hochbau, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN 31051 (2003): Grundlagen der Instandhaltung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN 68800-3 (1990): Holzschutz; Vorbeugender chemischer Holzschutz, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 1990 (2002): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag, Berlin

DIN EN 13306 (2001): Begriffe der Instandhaltung, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN 14411 (2006): Keramische Fliesen und Platten, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN ISO 10545-2 (1997): Keramische Fliesen und Platten – Teil 2: Bestimmung der Maße und der Oberflächenbeschaffenheit, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN ISO 14040 (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN EN ISO 14044 (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin

DIN ISO 15686-1 (2000): Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles. ISO Copy Right Office, Geneva (CH)

DIN ISO 15686-2 (2001): Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 2: Service life prediction procedures. ISO Copy Right Office, Geneva (CH)

DIN ISO 15686-3 (2002): Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 3: Performance audits and reviews. ISO Copy Right Office, Geneva (CH)

DIN ISO 15686-4 (2003): Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 4: Data requirements. ISO Copy Right Office, Geneva (CH)

DIN ISO 15686-5 (2007): Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life cycle costing. ISO Copy Right Office, Geneva (CH)

DIN ISO 15686-6 (2004): Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 6: Procedures for considering environmental impacts. ISO Copy Right Office, Geneva (CH)

DIN ISO 15686-7 (2005): Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practice. ISO Copy Right Office, Geneva (CH)

DIN ISO 15686-8 (2008): Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 8: Reference service life and service-life estimation. ISO Copy Right Office, Geneva (CH)

DIN ISO/TS 15686-9 (2008): Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 9: Guidance on assessment of service-life data. ISO Copy Right Office, Geneva (CH)

DIN ISO/WD 15686-10 (2007): Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 10: Functional requirements and capability. ISO Copy Right Office, Geneva (CH)

DIN ISO 80000-1 (2009): Quantities and units – Part I: General. ISO Copy Right Office, Geneva (CH)

Anhang

A BAUELEMENTE DER KOSTENGRUPPE 300 NACH DIN 276-1

Die Kostengruppe 300 ist nach DIN 276-1 (2006) in die folgenden Unterebenen eingeteilt:

Abbildung A-1: Kostengruppe 300 der DIN 276-1 (2006)

300	<u>Bauwerk – Baukonstruktion</u>		
310	Baugrube	350	Decken
311	Baugrubenherstellung	351	Deckenkonstruktionen
312	Baugrubenumschließung	352	Deckenbeläge
313	Wasserhaltung	353	Deckenbekleidungen
319	Baugrube, sonstiges	359	Decken, sonstiges
320	Gründung	360	Dächer
321	Baugrundverbesserung	361	Dachkonstruktionen
322	Flachgründungen	362	Dachfenster, Dachöffnungen
323	Tiefgründungen	363	Dachbeläge
324	Unterböden und Bodenplatten	364	Dachbekleidungen
325	Bodenbeläge	369	Dächer, sonstiges
326	Bauwerksabdichtung	370	Baukonstruktive Einbauten
327	Dränagen	371	Allgemeine Einbauten
329	Gründung, sonstiges	372	Besondere Einbauten
330	Außenwände	379	Baukonstruktive Einbauten, sonst.
331	Tragende Außenwände	390	Sonst. Maßnahmen für Bauko.
332	Nichttragende Außenwände	391	Baustelleneinrichtung
333	Außenstützen	392	Gerüste
334	Außentüren und -fenster	393	Sicherungsmaßnahmen
335	Außenwandbekleidungen, außen	394	Abbruchmaßnahmen
336	Außenwandbekleidungen, innen	395	Instandsetzungen
337	Elementierte Außenwände	396	Materialentsorgung
338	Sonnenschutz	397	Zusätzliche Maßnahmen
339	Außenwände, sonstiges	398	Provisorien
340	Innenwände	399	Sonst. Maßn. für Bauko., sonst.
341	Tragende Innenwände		
342	Nichttragende Innenwände		
343	Innenstützen		
344	Innentüren und -fenster		
345	Innenwandbekleidungen		
346	Elementierte Innenwände		
349	Innenwände, sonstiges		

B LEBENSDAUERQUELLEN

Auflistung der Lebensdauerquellen mit Datenherkunft, Randbedingungen und Definitionen, soweit vorhanden:

Lebensdauer nach Wertermittlungs-Richtlinien, 1991

(aus Anlage 5 – Technische Lebensdauer von baulichen Anlagen und Bauteilen in Wertermittlungs-Richtlinien 1991 von Simon (1992))

In Anlage 5 der Wertermittlungsrichtlinien von 1991 sind Mittelwerte der technischen Lebensdauer als Grenzwerte für die wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer bei zweckentsprechender Nutzung und ordnungsgemäßer Unterhaltung angegeben. Weitere Angaben zur Datengrundlage der einzelnen Quellen oder zu statistischen Auswertungen werden nicht gemacht.

Lebensdauer nach IP Bau, 1994

Die folgenden Lebensdauer-Quellen entstammen alle dem Forschungsbericht „Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten“ vom Impulsprogramm IP BAU, Schweizer Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern 1994. In diesem Bericht werden die technischen Lebensdauern aus den verschiedenen Quellen für die jeweiligen Bauteile in tabellarischer Form gegenübergestellt. Weitere Angaben zur Datengrundlage der einzelnen Quellen oder zu statistischen Auswertungen werden nicht gemacht.

- Lebensdauer nach ETH Arbeitsbericht, 1970
(aus Tatbestand Wohnen von L. Burkhardt, M. Flury, H. Ronner, ETH Arbeitsbericht A15, Zürich 1970)
- Lebensdauer nach Schweizer Verband für Wohnungswesen, 1974
(aus Schweizerischer Verband für Wohnungswesen, Schriftenreihe SVW Nr. 3 1974, Merkblatt 1981)
- Lebensdauer nach Planung und Projektierung, 1980
(aus Sanierungshandbuch Planung und Projektierung, 1980)
- Lebensdauer nach Amt für Bundesbauten, 1981
(aus Abnutzungsdauer (Mutmaßliche Nutzungsdauer in Jahren) vom Amt für Bundesbauten; 1981)
- Lebensdauer aus Liegenschaftsschätzer, 1988
(aus Handbuch des Liegenschaftsschätzers von W. Nägeli, K. Hungerbühler, Zürich, 1988)
- Lebensdauer nach Schweizer HEV, 1994

(aus Lebensdauer von Wohnungseinrichtungen vom Schweizerischen Hauseigentümerverband, 1994)

- Lebensdauer nach UB Hannover, 1987
(aus Lebensdauer von Bauteilen und Baustoffen von UB/TIB Hannover, 1987, Forschungsbericht T 1932)
- Lebensdauer nach Zustandsbewertung, 1992
(aus Zustandsbewertung großer Gebäudebestände von J. Schröder; 1992)
- Lebensdauer nach IP Bau, ETH, 1993
(aus Grundlagen für den Unterhalt und die Erneuerung von Wohnbauten von IP Bau; ETH-Zürich, 1993)

Lebensdauer nach Hirschberger, 1998

(aus „Senkung der Baufolgekosten durch systematische und zustandsabhängige Erhaltung von Gebäuden und langzeitoptimale Baustoffwahl“ von H. Hirschberger, R. Schween, J. Schwarte, Hrsg.: Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart – 1998)

Die Angaben zu den Lebensdauern der Gebäudeelemente stützen sich im Wesentlichen auf Angaben der Veröffentlichung „Wirtschaftliche Instandhaltung von Wohngebäuden durch methodische Inspektion und Instandsetzungsplanung“ von Krug aus dem Jahre 1985. Dort wurde Datenmaterial aus Erfahrungswerten und Umfragen statistisch ausgewertet und Erwartungswerte mittlerer Lebensdauern bedeutsamer Gebäudeelemente bestimmt. Es wurden Angaben zur mittleren Lebenserwartung bei normalen, durchschnittlichen Verhältnissen bezüglich. Nutzung, Qualität, Umwelt und Instandhaltungsintensität gemacht. Eine nähere Definition der abgefragten Lebensdauer wird nicht gegeben.

Lebensdauer nach Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung NRW, 1995

(aus „Geplante Instandhaltung“ von A. Tomm, O. Rentmeister, H. Finke, Hrsg.: Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung NRW, Schriftenreihe Nr. 1.31 – 1995)

In LBB1995, wie diese Quelle üblicherweise genannt wird, wird ein Bauelementekatalog für diejenigen Bauelemente angegeben, die einer Wartung und Instandsetzung unterliegen. Die Gliederung erfolgt in Anlehnung an DIN 276-1. Es werden Angaben zur mittleren Lebenserwartung bei normalen, durchschnittlichen Verhältnissen bezüglich. Nutzung, Qualität, Umwelt und Instandhaltungsintensität gemacht. Eine nähere Definition der Lebensdauer wird nicht gegeben. Die Werte wurden aus Erfahrungswerten und Umfragen ermittelt und müssen daher auf Plausibilität überprüft werden. Vor allem auch, weil nach eigenen Angaben wegen zu großer Streubreiten bei der Datenermittlung auf die Durchführung einer statistischen Auswertung verzichtet wurde.

Lebensdauer nach Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein, 1995

(aus „Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten“ von Prof. P. Steiger, Intap AG, Hrsg.: SIA-Dokumentation D 0123, Zürich – 1995)

Der Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein stellt in seiner Dokumentation D 0123 eine Beurteilungsmethode für die Auswahl und Optimierung von Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten vor, die möglichst schon in der Planungsphase eines Gebäudes berücksichtigt werden sollte. Es werden Angaben zur Nutzungszeit gemacht, die die mittlere Nutzungsdauer unter Berücksichtigung des Konstruktionsaufbaus sowie des Ersatzes einzelner Schichten betreffen. Größtenteils wird auf Werte vom Amt für Bundesbauten „Nutzungszeiten von Gebäuden und Bauteilen“, 1995 zurückgegriffen. Eine nähere Definition der Lebensdauer wird nicht gegeben.

Lebensdauer nach Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V., 1998

(aus Sanierungsgrundlagen Plattenbau vom Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. an der TU Berlin (IEMB), Hrsg.: IRB Verlag, Stuttgart, November 1998)

Zu dieser Quelle liegen nur die reinen Datensätze vor, die in den Leitfaden Nachhaltiges Bauen, 2001 bzw. in den Forschungsbericht Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau, 2004 eingeflossen sind.

Lebensdauer nach Leitfaden Nachhaltiges Bauen, 2001

(aus „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“, Hrsg.: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, Januar 2001)

Im Leitfaden Nachhaltiges Bauen wird ein Bauelementekatalog für die ökologische und ökonomische Bewertung über den Lebenszyklus eines Gebäudes angegeben. Lebensdauerdaten werden als von- bis- Werte mit mittlerer Lebenserwartung als Orientierungswert dargestellt. Da die tatsächliche Lebensdauer unter Anderem von Bauteileigenschaften, Ausführungsqualität, konkreter Beanspruchung, Wartung und Instandhaltung abhängig ist, kann vom gegebenen Orientierungswert abgewichen werden. Ob bei den Angaben die technische oder die wirtschaftliche Lebensdauer gemeint ist, wird nicht näher erläutert. Die Funktion als Nutzungsphase im Rahmen der Bewertung innerhalb einer Lebenszyklusanalyse lässt darauf schließen, dass die Gesamtnutzungsdauer gemeint ist, die für die einzelnen Bauelemente als technische Lebensdauer angesehen werden kann.

Folgende Quellen liegen den Lebensdauerdaten des Leitfadens Nachhaltiges Bauen zugrunde:

SIA D 0123, IEMB 1998, BMBau 1994, LBB 1995, Wert R 91, VDI 2067, IPBau 1994

Lebensdauer nach Hellerforth, 2001

(aus „Facility Management – Immobilien optimal verwalten“, Hrsg.: Haufe Mediengruppe, Freiburg Berlin München Zürich, 2001)

Das Facility Management Buch von Frau Prof. Michaela Hellerforth ist ein umfassendes Werk zu allen Facetten des Facility Management. Lebensdauerdaten werden in verschiedenen Gliederungsebenen und unterschiedlichen Gruppierungen genannt. Es handelt sich dabei um die mittlere technische Lebensdauer aus verschiedenen Quellen. Nach Überprüfung aller Angaben wurden die Lebensdauerangaben von K.-H. Cox: „Instandhaltungsmanagement“ in die Betrachtung mit aufgenommen. Eine weitere Spezifizierung der Datenbasis liegt nicht vor.

Lebensdauer nach Schweizerischer Eidgenossenschaft, 2003

(aus „Technische Weisung Beurteilung von Energiesystemen und Energiesparmassnahmen; Einführung/Programmbeschreibung und standardisierte Nutzungszeiten von Gebäuden/Bauteilen“, Hrsg.: Armasuisse Immobilien, Bern, 2003)

Dieses Dokument ist ein Arbeitsmittel zur Beurteilung von Energiesystemen und Energiesparmassnahmen, und legt als „Technische Vorgabe“ den generellen Standard fest. Die angegebenen Nutzungsdauern gelten als durchschnittliche Nutzungsdauer eines Gebäudes, Bau- oder Anlageteils oder einer Komponente davon. Die Nutzungszeiten gelten nur für marktgängige Gebäude, d. h. für solche, die auch von privaten Institutionen ohne große Umbaukosten genutzt werden können. Es werden verschiedene Einflüsse auf die Nutzungsdauern angegeben, allerdings werden keine konkreten Angaben gemacht. Als globale maximale Nutzungszeiten werden folgende Grenzwerte angesetzt:

Wohnen	60 Jahre	Industrie	20 Jahre
Verwaltung	50 Jahre	Forschung	30 Jahre
Gewerbe	40 Jahre	Lehre	40 Jahre

Auf welche Quellen oder Basisdaten sich die angegebenen Werte beziehen ist nicht bekannt.

Lebensdauer nach IFB, 2004

(aus Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau vom Institut für Bauforschung e.V.; Forschungsbericht F2464, Hannover 2004)

In diesem Forschungsbericht sind die technischen Lebensdauern von Bauteilen im Wohnungsbau bei normaler Nutzung und Pflege aus verschiedenen Quellen mit eigener Wertung angegeben.

Folgende Quellen liegen den Angaben des Instituts für Bauforschung zugrunde:

WertR 1991, Häufigkeitskatalog 1976, LBB 1995, Schmitz 2001, Leitfaden NB 2001

Lebensdauer nach Schmitz, 2004

(aus Instandsetzung / Sanierung / Modernisierung / Umnutzung von Schmitz, H.; Krings, E.; Dahlhaus, U.; Meisel, U. in Baukosten 2004, Hrsg.: Verlag für Wirtschaft und Verwaltung Hubert Wingen, Essen 2004)

In dieser Quelle sind Haltbarkeitszeiten für die technische Dauerhaftigkeit bei normaler Nutzung und Pflege angegeben. Der Maximalwert wird mit 100 Jahren angenommen.

Folgende Quellen liegen den Angaben in Schmitz 2004 zugrunde:

WertR 1991, Schmitz 1981, LBB 1995, AfB Bern

Lebensdauer nach SV-Landesverband, 2006

(aus Nutzungsdauerkatalog baulicher Anlagen und Anlagenteile vom Sachverständigen-Landesverband Steiermark und Kärnten. Eigenverlag, 3. Aufl., Graz, 2006)

Die in dieser Quelle angegebenen Nutzungszeiten sind ausdrücklich auf die Werte praktischer Erfahrung abgestellt, die insbesondere einschließen, dass die Nutzungsdauerzeiten in zunehmendem Maße von anderen Kriterien als von spezifischen Alterungsverläufen der Bauteile bestimmt werden, wozu neben der verstärkten Betonung der wirtschaftlich vertretbaren Nutzungsdauer auch die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Bauteilen im Zusammenhang mit der Praxis der Erneuerungszyklen von wesentlicher Bedeutung sind. Die Angaben über die Nutzungsdauer erfolgen in Jahren und bestehen in der Regel aus einem unteren und einem oberen Wert. Alle Angaben setzen voraus, dass die Bauteile den normgemäßen Anforderungen entsprechen, sach- und fachgerecht verwendet werden, einer üblichen Nutzung unterworfen sind und ordnungsgemäß gewartet und instand gehalten werden.

Lebensdauer nach Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V., 2006

(aus Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten vom Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. an der TU Berlin (IEMB), Info-Blatt Nr. 4.2, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, Dezember 2006)

In diesem Info-Blatt wird ein Bauelementekatalog für die ökologische und ökonomische Bewertung über den Lebenszyklus eines Gebäudes angegeben. Lebensdauerdaten werden als von- bis- Werte mit mittlerer Lebenserwartung als Orientierungswert dargestellt. Da die tatsächliche Lebensdauer unter Anderem von Bauteileigenschaften, Ausführungsqualität, konkreter Beanspruchung, Wartung und Instandhaltung abhängig ist, kann vom gegebenen Orientierungswert abgewichen werden. Weitere Angaben zur genaueren Definition der Lebensdauer werden nicht gemacht.

Folgende Quellen liegen den Lebensdauerdaten des Info-Blattes 4.2 zugrunde:

SIA 1995, BMBau 1994, LBB 1995, Wert R 91, VDI 2067, IPBau 1994

Lebensdauer nach Institute for Building Operations Research, 2007

(aus Technische Lebensdauern – Synopse vom Institute for Building Operations Research at Nürtingen-Geislingen University, Oktober 2007)

In dieser Quelle wird ein Bauelementekatalog zur Optimierung von Instandhaltungsmaßnahmen angegeben. Es werden technische Lebensdauerdaten als von- bis- Werte mit mittlerer Lebenserwartung auf verschiedenen Quellen basierend angegeben. Da nicht alle Basisquellen gefunden werden konnten und die Beschreibung der Bauelemente sehr kurz und allgemein gehalten ist, muss auch hier eine ausführliche Plausibilitätsprüfung durchgeführt werden.

Folgende Quellen liegen den Angaben nach ifbor zugrunde:

BaK 1994, Keller S. 1995, Kleiber W. 1997, VDI E 2067, BMBau 04.051, BMBau 1991.08, Lutz W. 1997, MLSWV NRW DAB 1987.09, Uni BS Bauwirtschaft 1995.09.11, IfB F 1869

Lebensdauer nach BMVBS Zwischenauswertung, 2008

(aus Zwischenauswertung Datenbank; www.nachhaltigesbauen.de, Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Stand: 01.09.2008)

Die Angaben der Nutzungsdauern in der Datenbank-Zwischenauswertung werden in sog. Experten- bzw. Erfahrungswerten angegeben. Die Bandbreite unterschiedlicher Bauteilausführungen, Einsatzorte und Beanspruchungen wird durch die Angabe eines Minimal-, eines Maximal- und eines Durchschnittswerts berücksichtigt. Darüber hinaus wird bei mehrschichtigen oder zusammengesetzten Bauteilen, deren Einzelkomponenten unterschiedliche Nutzungsdauern erwarten lassen, jede Bauteilschicht, bzw. Bauteilkomponente einzeln angegeben. Es werden sowohl vorhanden Quellen als auch neue Expertenbefragungen in die Auswertung einbezogen.

Folgende Quellen liegen den Angaben der Datenbank zugrunde:

Leitfaden Nachhaltiges Bauen 2001, SIA 1995, IFB 2004, HdZ-Projekt 805785, Baustoffdaten Ökoinventare (Uni Karlsruhe), www.bauteilkatalog.ch, SV-Landesverband 2006,

Lebensdauer nach BTE-Arbeitsgruppe, 2008

(aus Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe: Lebensdauer von Bauteilen; Hrsg.: Bund Technischer Experten, Essen 2008)

Von der BTE-Arbeitsgruppe wird ein Bauelementekatalog mit Angabe der technischen Lebensdauer als mittlerer Schätzwert aus Umfragen bei Sachverständigen und sonstigen Fachleuten gegeben. Diese Werte wurden anhand von Literaturangaben auf Plausibilität geprüft und im Kreise der BTE-Fachleute diskutiert.

Folgende Quellen liegen der Vergleichsberechnung der BTE-Arbeitsgruppe zugrunde:

Klocke 1998, IFB 2004, Nutzungsdauerkatalog Graz 2006, WertR 2006, Schmitz 2002

Lebensdauer nach Schweizer Mieterverband, 2008

(aus Lebensdauertabelle unter www.mieterverband.ch des Schweizer Mieterverbandes; Hrsg.: Schweizerischer Mieterinnen- und Mieterverband, Zürich, 2008)

In der Lebensdauertabelle des Schweizerischen Mieterinnen- und Mieterverbandes werden Mittelwerte der Lebensdauer bzw. mögliche Maximalwerte unter normalen Randbedingungen und üblicher Nutzung angegeben. Die Werte beziehen sich auf Erfahrungswerte aus Wohngebäuden und sind nur nach Plausibilitätsprüfung auf Öffentliche Gebäude übertragbar. Es konnten keine weiteren Erkenntnisse zu Datenquellen, Datenbasis oder Lebensdauerdefinitionen gefunden werden.

Lebensdauer nach BBSR Info-Blatt 4.2, 2009

(aus Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten, Hrsg.: Kompetenzzentrum der Initiative „Kostengünstig qualitätsbewusst Bauen“ im Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2009)

Im BBSR Info-Blatt 4.2 werden Lebenserwartungen von Bauteilen und Bauteilschichten, gegliedert nach ihrer Funktion, angegeben. Die tatsächliche Lebensdauer der Elemente wird von verschiedensten Faktoren beeinflusst. Die Lebenserwartung wird deshalb mit von-bis-Werten angegeben. Für die Bewertung kann die mittlere Lebenserwartung als Orientierung angesetzt werden. Die tatsächliche Lebenserwartung weicht ggf. von den angegebenen Werten ab. Die angegebenen Werte beruhen auf der Auswertung der folgenden Quellen:

SIA 1995, BMBau 1994, LBB1995, Wert-R 1991, VDI 2067 Blatt1 1983, IP Bau 1994

Lebensdauer nach BBSR Nutzungsdauerangaben, 2009

(aus Nutzungsdauerangaben Entwurf der Endfassung, Hrsg.: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2009)

In den Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen der Kostengruppen 300, 400 und 500 nach DIN 276-1 werden Lebensdauerangaben von Bauteilen und Bauteilschichten, gegliedert nach DIN 276, angegeben. Die Bandbreite unterschiedlicher Bauteilausführungen, Einsatzorte und Beanspruchungen wird durch die Angabe eines Minimal-, eines Maximal- und eines Durchschnittswerts berücksichtigt. Darüber hinaus wird bei mehrschichtigen oder zusammengesetzten Bauteilen, deren Einzelkomponenten unterschiedliche Nutzungsdauern erwarten lassen, jede Bauteilschicht, bzw. Bauteilkomponente einzeln angegeben. Die Werte bauen auf der Zwischenauswertung von 2008 auf und wurden durch weitere Expertenbefragungen aktualisiert bzw. ergänzt.

C LISTE DER MASSGEBENDEN KEY-KOMPONENTEN

Tabelle C-1: Liste der maßgebenden Key-Komponenten (ohne Darstellung der Elementebene)

KG	Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe
310	Baugrube		
320	Gründung		
330	Außenwände		
334	Außentüren und –fenster	Fenster	
334			Rahmen und Flügel
334			Beschläge
334			Verglasung
334			Abdichtung
334		Türen	
334			Standardtüren, außen
334			Automatiktüren
334			Toranlagen
335	Außenwandbekleidungen, außen	WDVS	
335			Dämmschicht
335		Trockenbauweise	Kerndämmung
335		Vorsatzschale	Dämmschicht
335		Unterkonstruktionen	
335		Putz	
335		Keramische Bekleidung	
335		Sonst. Bekleidung	
335		Vorsatzschale	
335		Außenanstriche	
338	Sonnenschutz	Jalousien, Rolläden	
340	Innenwände		
345	Innenwandbekleidungen	Innenbekleidungen	
345			Standardbekleidungen
345			Keramische Fliesen
345			Natursteinbekleidungen
345			Kunststeinbekleidungen
345			Tapeten
345			Metallbekleidungen
345			Spezial-Bekleidungen
345		Innenputze	
345			Standard-Innenputze
345			Mineralische Deckputze
345		Oberflächenschutz	
345			Innenanstriche
346	Elementierte Innenwände	Nicht tragende Wände	
346			Sanitärtrennwände

Anhang C - Liste der massgebenden Key-Komponenten

KG	Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe
350	Decken		
352	Deckenbeläge	Bodenaufbauten	
352			Estriche u. Oberböden
352			Doppelböden
352			Schwingböden
352		Bodenbeläge	
352			Glatte Beläge
352			Teppichböden
352			Schmutzfangbeläge
352			Steinbeläge
352			Keramische Fliesen
352		Bodenschutz	
353	Deckenbekleidungen	Deckenbekleidungen	
353			Tapeten
353			Putz
353			Holzbekleidung
353			Trockenbau
353			Metallbekleidungen
360	Dachkonstruktionen		
362	Dachfenster, Dachöffnungen	Belichtungsöffnungen	
362			Dachausstiege, Luken
362			Dachflächenfenster
363	Dachbeläge	Deckschichten	
363			Halme
363			Platten und Schuppen
363			Metallbanddeckungen
363		Entwässerung	
363			Dachrinnen/Fallrohre
363			Dachabläufe
364	Dachbekleidungen	Abdichtung, außen	
364			Abdichtmassen
364			Abdichtungsbahnen
364		Schutzschichten	
364		Dachdämmung	
364			Zw.sparrendämmung
364			Aufdachdämmung
369	Dächer, sonstiges	Schutzanlagen	
369			Blizschutzanlagen
369			Absturzsicherungen
370	Baukonstruktive Einbauten		
390	Sonst. Maßnahmen für Bauko.		

D BESCHREIBUNG DER BAUTEILGRUPPEN MIT SCHÄDIGUNGSMECHANISMEN

D.1 Fenster

Der enorme Einfluss der Fenster auf den Wohn- und Gebrauchswert eines Gebäudes haben das Fenster, neben dem Faktor der Fassadengestaltung, zu einem bedeutsamen Wertfaktor gemacht. Der Wohnwert liegt vor allem in der Belichtung der Räume und der Möglichkeit durch das Fenster die Wohnumwelt wahrzunehmen. Der Gebrauchswert als Teil des Gebäudewertes wird vor allem durch die Lebensdauer und die Größenordnung der Herstellungs-, Wartungs- und Instandhaltungskosten bestimmt. Wärme- und Schallschutz gelten heute schon als Indikatoren für die Gebrauchsdauer, die kaum noch von der Lebensdauer der Fensterrahmen, Gläser und Beschläge abhängen, sondern von den geänderten Nutzungsanforderungen. Die Intervalle der Fenstererneuerung haben sich dadurch von 80 Jahren in der Vergangenheit heute auf etwa 40 Jahre verkürzt. Empfehlungen aus der Praxis weisen sogar auf einen Austauschrhythmus von unter 20 Jahren hin, um der immer schneller werdenden Entwicklung gerecht zu werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aus einfachen Fensterkonstruktionen komplizierte Bauteile geworden sind. Das liegt nicht nur an den Baustoffen der Rahmen und Flügel, sondern ebenso an den Gläsern, Beschlägen und Einbaumöglichkeiten sowie der geforderten Dichtheit der Fenster.

Fenster lassen sich als Bauteil nicht isoliert von den jeweiligen Einbaubedingungen betrachten. Je nach Fensterwerkstoff und Fenstersystem sind zum Teil ähnliche, zum Teil unterschiedliche Einflussgrößen wirksam. Im Folgenden werden die nach Klein (1994) wichtigsten Schädigungsmechanismen, die zu einem vorzeitigen Ende der Lebensdauer führen können, zusammengefasst dargestellt:

- Holzfenster (Faktoren A, C, E, G)
 - Regendurchlass und Holzzerstörung durch aufgegangene Eckfügungen
 - Wind- und Regenundichtigkeiten
 - Holzverwerfungen, die zu Undichtigkeiten führen
 - Anstrichabplatzungen
- Metallfenster (Faktoren A, E, G)
 - Undichte Eckfügungen bei Aluminiumfenstern
 - Undichte Mitteldichtungen bei Aluminiumfenstern
 - Anätzung von Alu-Fensterprofilen und Fassadenbekleidungen
 - Korrosion von Stahlfensterrahmen
- Kunststofffenster (Faktoren A, D, E)
 - Funktionsstörungen durch Klemmen oder Festhaken nach starker Sonneneinstrahlung
 - Tauwasserausfall am Fensterrahmen

- Zerstörung von PVC-Rahmen (Sprung)
- Glasbausteinfenster (Faktoren A, C, E, F, G)
 - Kalkabscheidungen auf der Glasoberfläche
 - Regendurchlässigkeit
 - Zerstörung von Glasbausteinen
- Material- und Systemunabhängige Schäden (Faktoren B, C, D, E)
 - Fensteranschlag am Gebäude
 - Schimmelpilzbildung im Leibungsbereich
 - Undichte Rollladenkästen
 - Undichte Anschlüsse
 - Unzureichende Fixierung der Fenster in der Wandöffnung

D.2 Türen

Das Sich-öffnen-und-schließen-lassen von Türen und Toren ist in der heutigen Zeit nicht mehr die einzige Funktion die Türen und Tore erfüllen müssen. Die Bandbreite reicht von einbruchhemmenden, schall- oder wärmedämmenden Eigenschaften über automatische Antriebe bis hin zu Türen mit „Anti-Panik-Funktion“. Aufgrund dieser Vielfalt gibt es erst seit 2006 eine allgemeine Türennorm, die Begriffe, Anwendungsbereiche und Anforderungen festlegt. Im Rahmen des europäischen Binnenmarktes wurden durch die Bauprodukten-Richtlinie, das CE-Zeichen und die europäische Normung im Laufe der Zeit einheitliche Anforderungen an Türen beschrieben, die neben zahlreichen Prüf- und Klassifizierungsnormen sowie Normen für die Bestandteile einer Tür die wesentlichen Eigenschaften festlegen.

Türen bilden den beweglichen Abschluss einer Raum- oder Gebäudeöffnung und müssen sich leicht öffnen und schließen lassen. Darüber hinaus werden an Türen gestalterische Anforderungen gestellt; sie sind Kommunikationsinstrumente, die beispielweise einladend, nichts sagend oder abschreckend wirken können. Der optische Eindruck, der sich durch Größe, Geometrie, Farbe, Baustoff, Oberflächenbeschaffenheit und Maßgenauigkeit ergibt, spielt eine immer größere Rolle. Durch Schönheitsfehler kann der Geltungswert einer Tür erheblich beeinträchtigt werden.

Nach Schuhmacher (2001) führen die folgenden Schädigungsmechanismen, je nach Werkstoff, zu einem vorzeitigen Ende der Lebensdauer:

- Holz- und Holzwerkstofftüren (Faktoren A, B, C, D, E)
 - Mechanische oder hygrothermische Verformungen
 - Montagefehler
 - Ungeeigneter Einsatzbereich
- Türen aus Metall (Faktoren A, C, D, E)
 - Korrosion von Stahltüren
 - Mechanische oder hygrothermische Verformungen

- Türen aus Kunststoff (Faktoren A, D, E)
 - o Mechanische oder hygrothermische Verformungen
 - o Funktionsstörungen durch Klemmen oder Festhaken nach starker Sonneneinstrahlung
- Materialunabhängige Schäden (Faktoren A, B, C, D, E)
 - o Montagefehler
 - o Schäden an Türschwellen wegen Wassereindringung
 - o Tauwasserschäden
 - o Unzureichende Öffnungsgröße
 - o Ungeeignete Öffnungsrichtung

D.3 Außenwandbekleidung, außen

Außenwandbekleidungen sind eine von der Tragkonstruktion getrennte äußere Schicht des Gebäudes. Sie haben insbesondere eine Schutzfunktion für die darunter liegende Konstruktion. Seit längerer Zeit gilt diese Funktion auch für Wärmedämm-Verbundsysteme, die auch aus bauphysikalischen Gründen außen an der Konstruktion angebracht werden. Zudem haben Außenwandbekleidungen aber auch die Aufgabe, den gestalterischen Ansprüchen und dem optischen Erscheinungsbild des Gebäudes zu genügen. Dabei kann auf viele verschiedene Arten von Bekleidungen und flächenbildenden Bauteilen zurückgegriffen werden.

Die Kostengruppe Außenwandbekleidung nach DIN 276 umfasst alle vor einer tragenden Konstruktion angeordneten Elemente. Dazu gehören nicht nur Putz und Fassadenanstrich sondern auch Vorhangfassaden und Wärmedämm-Verbundsysteme. Die Kostengruppe 335 wird deshalb unterteilt in die funktionalen Bereiche der reinen Bekleidung und deren Beschichtung, der Unterkonstruktion, des Putzes und der Dämmschichten, die sowohl im Verbund mit dem Putz als auch in einer hinterlüfteten Fassade angeordnet sein können.

Aufgrund der Vielfalt von Fassadensystemen und Materialien werden hier nur beispielhaft die möglichen Schädigungsmechanismen von Wärmedämmverbundsystemen und Glasfassaden aufgelistet. Zunächst sind im Folgenden die Schadensbilder an Wärmedämmverbundsystemen nach Cziesielski und Vogdt (2007) zusammengefasst dargestellt:

- Untergrund (Faktor C)
 - o Ungeeigneter / feuchter Untergrund
- Kleber (Faktor C)
 - o Zu geringer oder mangelhafter Kleberauftrag
 - o Fehlender Anpressdruck
- Wärmedämmung (Faktoren A, C, E)
 - o UV-Schädigung von Polystyrol-Dämmplatten
 - o Mineralfaserplatten mit unzureichender Querkzugfestigkeit

- Klaffende Fugen / Kreuzfugen
- Dübel (Faktor C)
 - Zu geringe Putzüberdeckung der Dübel
- Bewehrter Unterputz und Gewebe (Faktor C)
 - Fehlende Überlappung des Gewebes
 - Zu geringe Putzüberdeckung des Gewebes
 - Falten im Gewebe
- Schlussbeschichtung / Belag (Faktoren A, C, E)
 - Fehlende Grundierung
 - Rissbildung im Schlussbelag
 - Algenbildung
 - Fehlerhafte Anschluss- und Fugenausbildung

Schäden an Glasfassaden, die zu einem vorzeitigen Ende der Lebensdauer führen, können nach Küffner und Lummertzheim (2000) folgende Ursachen haben:

- Schäden am Tragwerk (Faktoren A, B, C, E)
 - Materialbedingte Schäden
 - Unzureichender Korrosionsschutz
 - Fehlerhafte Materialkombinationen
 - Mangelhafte Befestigungen
- Schäden an Füllungen (Faktoren A, G)
 - Glasbruchschäden (Rand / Auflagerpunkte)
 - Randundichtigkeit bei Isoliergläsern
 - Schäden an der Funktionsschicht
 - Schäden durch Reinigung
- Schäden an der Gesamtkonstruktion (Faktoren A, B, C, E)
 - Regenundichtigkeit
 - Fehlerhafte Entwässerung
 - Luftundichtigkeiten
 - Unzureichende Belüftung
- Mangelhafte Bauwerksanschlüsse (Faktoren B, C)
 - Undichte Baukörperanschlüsse
 - Behinderte Längenausdehnung
 - Baukörperverformungen
- Umgebungseinflüsse (Faktor E)
 - Verschmutzung
 - Salzhaltige Umgebungsluft
 - Saurer Regen
 - UV-Belastungen

Auf die Darstellung weiterer Fassadensysteme wird im Rahmen dieser Auflistung verzichtet. Es lässt sich festhalten, dass unabhängig von Fassadensystem und Material, die mangelhafte Ausbildung von Anschlüssen und Fugen als häufigste Schadensursache zu nennen ist.

D.4 Sonnenschutz

Verschattung, Verdunkelung und Schutz vor Auskühlung/Überhitzung lassen sich mit verschiedenen Mitteln erreichen. Die einfachste Form des temporären Sonnenschutzes sind Außenjalousien. Dünne, verstellbare Stahl-, Aluminium- oder Kunststofflamellen werden an Bändern vor der Scheibe geführt. Sie sind reparaturanfällig und werden vor allem durch Windkräfte zerstört.

Jalousieläden sind vorteilhaft, wenn nur eine Verschattung für die Sommerzeit gesucht wird. Zusätzlichen Wärmeschutz bieten geschlossene Holzläden, die dicht am Fensterstock anliegen.

Wenn die Fensterläden optisch stören, können Rollläden eingebaut werden, die bereits in die Außenwand integriert werden. Wegen des Preises werden heute PVC-Rollladenhohlprofile statt Holz benutzt, die mit Polyurethanschaum gefüllt sind. Energetisch ist der Rollladenkasten ein Schwachpunkt, da die kalte Luft bis an die Innenschale gelangt, auch wenn diese besonders gedämmt ist. Besonderes Augenmerk ist aus diesem Grund auf den Deckel des Rollladenkastens zu richten. Dieser sollte idealerweise z. B. aus stabilen Sperrholz bestehen, mit einer Korkplatte belegt sein und mit Gummidichtungen am Kasten anliegen. Nachträglich können Außenrollläden montiert werden. Wegen des geringen Raumbedarfs werden Aluminiumprofile eingesetzt, die außer der Verdunkelung einen gewissen Windschutz bieten.

Eine allgemeingültige Empfehlung über Anordnung und Auslegung von Sonnenschutzsystemen lässt sich nicht geben. Sie müssen den individuellen Gegebenheiten Rechnung tragen. Im Folgenden werden die nach Küffner und Lummertzheim (2000) maßgebenden Schädigungsmechanismen zusammengefasst dargestellt:

- Außenliegender Sonnenschutz (Faktoren C, E)
 - o Windeinfluss
 - o Fehlerhafte Montage
 - o Funktionsstörungen durch Klemmen oder Festhaken
- Innenliegender Sonnenschutz (Faktoren C, E, F)
 - o Mechanische oder hygrothermische Verformungen
 - o Funktionsstörungen durch Klemmen oder Festhaken
 - o Fehlerhafte Montage

D.5 Innenwandbekleidung

Innenwände bzw. Innenwandbekleidungen erfüllen insbesondere raumtrennende Funktion und in bauphysikalischer Hinsicht die Funktion der Schalldämmung zwischen Räumen und Wohnungen. Eine Wärmedämmung ist nur dann notwendig, wenn unterschiedliche Temperaturbereiche getrennt werden. Anforderungen an den Brandschutz bestehen insbesondere in an die Treppenhäuser (Fluchtwege) grenzenden Bereichen.

Massive Innenwände werden in der Regel geputzt; Ständerkonstruktionen beplankt und gespachtelt. Holzbekleidungen bilden die Ausnahme, z. B. in Präsentationsräumen. Die Bekleidungen erreichen, wenn keine Nutzungsänderungen vorgenommen werden, die Lebensdauer der Wandkonstruktion. Soweit eine tragende Funktion nicht nötig ist, wird in der Regel für die Innenwände eine leichte Konstruktion gewählt. Massive, nicht tragende Innenwände sind die Ausnahme und werden nur bei hohen Schallschutzansprüchen gewählt. Ein weiterer Aspekt ist eine mögliche Flexibilität bei Nutzungsänderungen, da eine Metall- oder Holzständerwand leichter wieder zu entfernen oder auch zu versetzen ist. Das bedeutet, dass sie vielfach das Lebensalter der Tragkonstruktion aus diesem Grunde nicht erreicht. Leichte Ständerwände für Sanitär- und Umkleieräume werden häufig nur als Sichtschutz angebracht. Ihre Lebensdauer ist deutlich geringer einzuschätzen als die von Ständerkonstruktionen in üblichen Büroräumen.

Die Schädigungsmechanismen von Innenwandbekleidungen sind entsprechend der Materialien und Wandsysteme sehr vielfältig. Betrachtet man die Fliesen- und Steinbeläge nach Zimmermann (2001), lassen sich folgende Schadensbilder feststellen, die zu einem frühzeitigen Ende der Lebensdauer führen können:

- Ablösungen vom Untergrund (Faktoren A, B, C)
 - Verformungen des Untergrundes
 - Ausdehnung der Plattenschicht gegenüber dem Untergrund
 - Stauchung der Plattenschicht durch behinderte Ausdehnung
 - Sprengdruck durch Volumenzunahme von Stoffen im Untergrund
- Risse (Faktoren A, B, C, F)
 - Rissbildung im Untergrund
 - Fehlende Bewegungsfugen
 - Faltung gestauchter Beläge und Bekleidungen
 - Spaltrisse in Natursteinen
 - Mängel durch Stöße und Schläge
- Materialmängel (Faktoren A, C)
 - Löcher in Natursteinplatten
 - Stoffablagerungen
 - Verfärbungen und Unregelmäßigkeiten

Schädigungsmechanismen sonstiger Bekleidungen werden anhand der Deckenbekleidungen von Satzger (1998) zusammengestellt:

- Konstruktive Mängel (Faktoren A, C)
 - o Mängel bei der Befestigung durch falsche Befestigungsart, ungeeignete Dübel, etc.
 - o Mangelhafte Unterkonstruktion
 - o Mängel der Bekleidung (Festigkeit, Plattenformat, Plattendicke)
- Bauphysikalische Mängel (Faktoren A, C, D)
 - o Feuchteschäden durch hohe Luftfeuchtigkeit
 - o Schäden durch Tauwasser
- Optische Mängel (Faktoren C, F, G)
 - o Verarbeitungs- und Herstellungsmängel
 - o Nutzungsbedingte Mängel durch Verschmutzung oder unsachgemäße Renovierung

D.6 Bodenaufbauten und -beläge

Der Aufbau eines Bodens über der tragenden Schicht besteht heute in der Regel aus einem Trittschallschutz, einem lastverteilenden Estrich und einer Nutzschicht in Form eines Belages. In der Gruppe Bodenbeläge sind die Teile des Bodenaufbaus aufgenommen, die über der tragenden Schicht liegen. Dabei wird in Bodenaufbau (wie Estrich oder Doppelboden), Belag und Beschichtung unterschieden. Die Anforderungen an die Nutz- bzw. Verschleiß-Schicht beziehen sich z. B. auf folgende Eigenschaften: Druckfestigkeit, Abnutzungsverhalten, Gleit- und Rutsicherheit, Lichteinheit, Maßhaltigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Trittschalldämmung, Luftschallabsorption, Dichtigkeit, elektrostatische Aufladung, Verhalten gegen chemische Einflüsse oder Reinigungsmöglichkeiten.

Die Schädigungsmechanismen der Bodenaufbauten und -beläge müssen für Aufbauten und Beläge getrennt aufgeführt werden. Schäden an Estrichen wurden aktuell von Aurnhammer (2008) zusammengestellt. Folgende Mängel können zu einem vorzeitigen Ende der Lebensdauer führen:

- Risse
- Einbrüche, Einmuldungen und Eindrückungen
- Festigkeitsverlust und Zerfall
- Verformungen, insbesondere bei Estrichen auf Trenn- und Dämmschicht
- Ablösung vom Untergrund
- Knackgeräusche
- Feuchteschäden
- Schäden durch fehlende Fugen bzw. Schäden an Fugen

Auf die Beläge im Einzelnen soll hier nicht eingegangen werden. Aus den Schadensberichten für elastische und textile Bodenbeläge, Fliesen und Natursteine sowie Holzfußböden werden die maßgebenden Schädigungsmechanismen zusammengefasst:

- Ablösungen vom Untergrund (Faktoren A, C, D)
 - o Verformungen des Untergrundes
 - o Ausdehnung der Plattenschicht gegenüber dem Untergrund
 - o Stauchung der Plattenschicht durch behinderte Ausdehnung
 - o Sprengdruck durch Volumenzunahme von Stoffen im Untergrund
 - o Schäden durch Feuchte im Untergrund
- Risse und Fugen (Faktoren A, C, F)
 - o Rissbildung im Untergrund
 - o Fehlende Bewegungsfugen
 - o Faltung gestauchter Beläge und Bekleidungen
 - o Spaltrisse in Natursteinen
 - o Mängel durch Stöße und Schläge
- Ausführungsmängel (Faktoren B, C)
 - o Zu große Höhengsprünge an Plattenfugen
 - o Schäden durch Verlegefehler bei Teppichen und Linoleum
 - o Fehlerhafte Klebstoffwahl
- Materialmängel (Faktoren A, B, C, D)
 - o Zu geringe Härte und Verschleißwiderstand
 - o Unzureichende Rutschhemmung
 - o Stoffablagerungen
 - o Verfärbungen und Unregelmäßigkeiten (Musterverzüge, Vergilbung, Shading, etc.)
 - o Gerüche und Schadstoffe
- Schäden bei der Nutzung (Faktor F)
 - o Abbrechen von Plattenkanten entlang Dehnfugen

D.7 Deckenbekleidungen

Deckenbekleidungen sind in der Regel mit ihrer Konstruktion direkt am tragenden Bauteil befestigt. Abgehängte Decken werden mit Abstand zum Bauteil mittels Abhängekonstruktion in der gewünschten Höhe oder z. B. dem aufgrund der Installation gewünschten Abstand von der Rohdecke abgehängt. Als Technisches Regelwerk gelten DIN 18168 Teil 1 und 2. Zu den Deckenbekleidungen gehören sowohl direkte Beschichtungen wie Putz, Spachtel, Tapete und/oder Farben als auch die Abhängungen mit Dämmung, Unterkonstruktion und deren Beplankung.

Die Schädigungsmechanismen von Deckenbekleidungen nach Satzger (1998) sind ähnlich der Wandbekleidungen zusammengefasst dargestellt:

- Konstruktive Mängel (Faktoren A, B, C)
 - o Mängel bei der Befestigung durch falsche Befestigungsart, ungeeignete Dübel, etc.
 - o Mangelhafte Unterkonstruktion (z. B. nicht zugelassene Abhänger, fehlerhafte Verbindungen, etc.)
 - o Mängel der Bekleidung (Festigkeit, Plattenformat, Plattendicke)
- Bauphysikalische Mängel (Faktoren A, B, C, D, E)
 - o Feuchteschäden durch hohe Luftfeuchtigkeit
 - o Schäden durch Tauwasser
 - o Schäden durch fehlende Winddichtigkeit
 - o Mängel bei Decken mit Anforderungen an Brand-, Wärme- oder Schallschutz
- Optische Mängel (Faktoren A, C, F, G)
 - o Verarbeitungs- und Herstellungsmängel
 - o Geometrische Mängel im Deckenbild bei Rasterdecken
 - o Nutzungsbedingte Mängel durch Verschmutzung oder unsachgemäße Renovierung

D.8 Dachfenster und -öffnungen

Dachfenster und -öffnungen werden nach ihrem Einsatz unterschieden in Ausstiege und Lichtöffnungen bei Flachdächern und in Dachfenster bei Schrägdächern. Öffnungen in Flachdächern werden insbesondere mit Lichtkuppeln ausgeführt. Lichtkuppeln sind Acrylglaskuppeln, die auf Aufsatzkränzen montiert und auf einem Rahmen, der mit der Rohdecke verbunden ist, befestigt werden. Der Aufsatzkranz wird in die Dachhaut eingebunden. Soweit eine Lüftung oder ein Rauchabzug notwendig ist, werden die Kuppeln mit einer manuell oder elektrisch betätigten Öffnungseinrichtung versehen. Dachfenster in Schrägdächern werden in der Regel bei nicht ausgebauten Dachräumen aus Stahl eingebaut. Sie müssen weder der Wärme noch der Schalldämmung genügen und dienen im Wesentlichen der Belüftung des Dachraumes. Dachflächenfenster werden bei ausgebauten Dachräumen zur Belichtung und Belüftung eingebaut. Sie dienen auch dem Wärme- und Schallschutz, müssen Regenwasser ableiten und luftdicht eingebaut sein.

Bei Dachflächenfenstern und sonstigen Dachöffnungen sind je nach Fensterwerkstoff und Fenstersystem zum Teil ähnliche, zum Teil unterschiedliche Einflussgrößen wirksam. Im Folgenden werden die nach Klein (1994) wichtigsten Schädigungsmechanismen, die zu einem vorzeitigen Ende der Lebensdauer führen können, zusammengefasst dargestellt:

- Holzfenster (Faktoren A, C, E, G)
 - o Regendurchlass und Holzzerstörung durch aufgegangene Eckfügungen
 - o Wind- und Regenundichtigkeiten
 - o Holzverwerfungen, die zu Undichtigkeiten führen

- Anstrichabplatzungen
- Metallfenster (Faktoren A, E, G)
 - Undichte Eckfügungen bei Aluminiumfenstern
 - Undichte Mitteldichtungen bei Aluminiumfenstern
 - Korrosion von Stahlrahmen
- Kunststofffenster (Faktoren A, D, E)
 - Funktionsstörungen durch Klemmen oder Festhaken nach starker Sonneneinstrahlung
 - Tauwasserausfall am Fensterrahmen
 - Zerstörung von PVC-Rahmen (Sprung)
- Material- und Systemunabhängige Schäden (Faktoren B, C, D, E)
 - Schimmelpilzbildung im Leibungsbereich
 - Undichte Anschlüsse

D.9 Dachbeläge

Die Unterteilung der Dachbeläge orientiert sich an den unterschiedlichen Belastungssituationen für die jeweils wichtigsten Materialien. Dabei wird sowohl nach der geometrischen Form des Daches, seiner Konstruktion als auch nach der Art der Eindeckung unterschieden. Die Dämmung wird getrennt von der Dacheindeckung, aber abhängig von der Konstruktion bewertet. Vereinfachend wird der Einsatz von Bitumen- oder Kunststoffbahnen auf flach geneigten Dächern nicht getrennt von den Flachdächern bewertet, auch wenn dabei im Detail sowohl konstruktiv als auch funktional Unterschiede vorhanden sind. Insbesondere bei frei bewitterten Dachflächen mit Rückstaubereichen entstehen erhöhte Beanspruchungen für die Dichtungsbahnen.

Für die Betrachtung der Schädigungsmechanismen müssen die Dachbeläge nach ihrer Konstruktionsart in Steildächer und Flachdächer getrennt werden. Die folgenden Mängel nach Zimmermann (2006) führen zu einem frühzeitigen Ende der Lebensdauer von Steildächern:

- Einflüsse des Tragwerks (Faktoren B, C, D, E)
 - Undichte Baukörperanschlüsse
 - Fäulnis von Holzbauteilen
- Umgebungseinflüsse (Faktoren C, D, E)
 - Verschmutzung
 - Saurer Regen
 - Hagelschlag
 - Mikrobiologischer Bewuchs
 - UV-Belastungen
 - Frostschäden an Deckwerkstoffen
 - Abheben von Dachdeckungen und Windverformung

- Konstruktive Mängel (Faktoren A, B, C, E)
 - o Mängel bei der Befestigung durch falsche Befestigungsart
 - o Mangelhafter Korrosionsschutz
 - o Schneeeintrieb durch Lüftungsöffnungen im Firstbereich
 - o Zuglufteintrag in die Dachkonstruktion
 - o Tauwasserbildung in der Dachdecke
 - o Mangelhafte Regendichtheit
 - o Aufwölbung von Blechen
- Nutzungsbedingte Mängel (Faktoren C, F, G)
 - o Verarbeitungs- und Herstellungsmängel
 - o Nutzungsbedingte Mängel durch Verschmutzung oder unsachgemäße Wartung

Die typischen Schadensfälle von Flachdächern lassen sich nach Oswald und Rojahn (2005) zusammenfassend darstellen:

- Mangelhafte Bauwerksanschlüsse (Faktoren A, B, C)
 - o Undichte Baukörperanschlüsse
 - o Behinderte Längenausdehnung
 - o Baukörperverformungen
- Umgebungseinflüsse (Faktoren D, E)
 - o Undichtheiten als Folge von Durchwurzelung
 - o Saurer Regen
 - o Mikrobiologischer Bewuchs
 - o UV-Belastungen
 - o Frostschäden an Abdichtungswerkstoffen
- Konstruktive Mängel (Faktoren A, B, C, D, E)
 - o Rissbildung aufgrund fehlender Dehnfugen
 - o Mangelhafte Gefällegebung und Entwässerung
 - o Mangelhafter Korrosionsschutz
 - o Tauwasserbildung in der Dachdecke
 - o Mangelhafte Regendichtheit
 - o Aufwölbung von Blechen
 - o Schwindrisse in Ort betonplatten
 - o Mangelhafte Befestigung der Platten
- Nutzungsbedingte Mängel (Faktoren C, F, G)
 - o Verarbeitungs- und Herstellungsmängel
 - o Nutzungsbedingte Mängel durch Verschmutzung oder unsachgemäße Wartung

D.10 Dachentwässerung und Schutzanlagen

Flachdächer sind möglichst auf kurzen Wegen nach innen zu entwässern. Für die Entwässerung werden als Abläufe insbesondere Flachdachgullys eingebaut, die in die Dachhaut eingebunden sind. Da sie gegen eindringende Blätter und sonstigem Unrat mit Sieben und Auffangkörben ausgerüstet sind, wird eine regelmäßige Reinigung notwendig. Ihre Lebensdauer hängt mit der Flachdachabdichtung zusammen. Bei einer Instandsetzung der Abdichtung wird auch der Gully neu eingesetzt werden müssen. Er kann allerdings, soweit er sich von der alten Abdichtung lösen lässt, weiterverwendet werden. Eine Entwässerung über außenliegende Dachrinnen und Fallrohre sollte nur bei geeigneten Dächern mit Abdichtung ausgeführt werden. Dachrinnen werden in der Regel an der Traufseite des Daches vorgehängt. Die Lebensdauer der Rinnen und Fallrohre ist abhängig von der Umweltbelastung, die sich mit dem ablaufenden Wasser bemerkbar macht, vom Pflegeaufwand und den Befestigungs- und Verbindungsmaterialien.

Belastbare Zubehöerteile für das Dach werden üblicherweise aus feuerverzinktem Stahl hergestellt, der gegen Korrosion geschützt sein muss. Insofern sind die Qualität der Verarbeitung und das verwendete Befestigungsmaterial zu beachten.

Im Bereich der Dachentwässerung und Schutzanlagen auf Dächern lassen sich Schädigungsmechanismen durch die folgende Auflistung zusammenfassen:

- Mangelhafte Bauwerksanschlüsse (Faktoren A, B, C)
 - o Undichte Baukörperanschlüsse
 - o Behinderte Längenausdehnung
 - o Baukörperverformungen
- Umgebungseinflüsse (Faktor E)
 - o Verschmutzung
 - o Saurer Regen
 - o UV-Belastungen
- Konstruktive Mängel (Faktoren A, B, C, E)
 - o Mängel bei der Befestigung durch falsche Befestigungsart, ungeeignete Dübel, etc.
 - o Mangelhafte Unterkonstruktion
 - o Kontaktkorrosion unterschiedlicher Materialien
- Nutzungsbedingte Mängel (Faktoren C, F, G)
 - o Verarbeitungs- und Herstellungsmängel
 - o Nutzungsbedingte Mängel durch Verschmutzung oder unsachgemäße Wartung

E AGGREGATIONS- UND SCHICHTMODELLE ZUSAMMENGESETZTER BAUTEILE

E.1 Fenster

Die nachfolgend dargestellten Kostenanteile wurden mit dem Programm „baulocc“, welches am Institut für Massivbau der TU Darmstadt (Herzog (2005)) entwickelt wurde, ermittelt. Höhere Erstinvestitionskosten können über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes durchaus durch geringere Folgekosten ausgeglichen werden. Nachfolgend ist zunächst ein allgemeines Hierarchiemodell mit gemittelten Lebensdauern und Kostenanteilen als Übersicht dargestellt. Anschließend werden die Modelle für drei Standardfenster abgebildet.

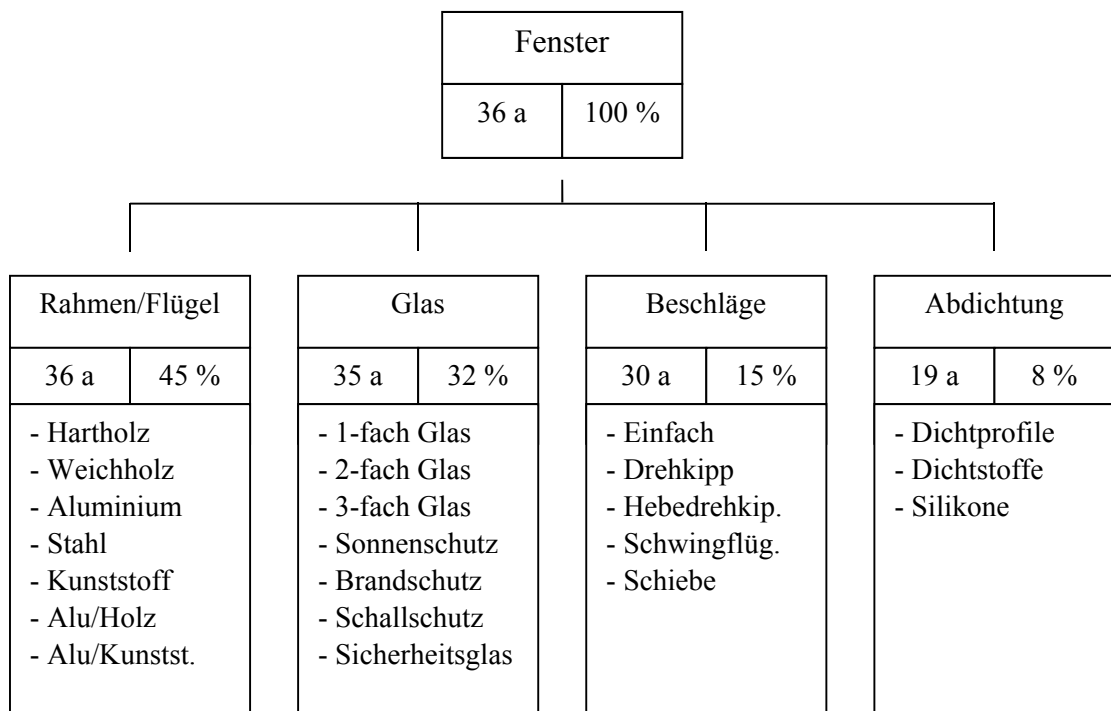


Abbildung E-1: Allgemeines Hierarchiemodell für Fenster

Standardbauteil Aluminiumfenster mit Dreh-Kipp-Flügel, Zweifachverglasung und Aluminiumdrehkippbeschlägen:

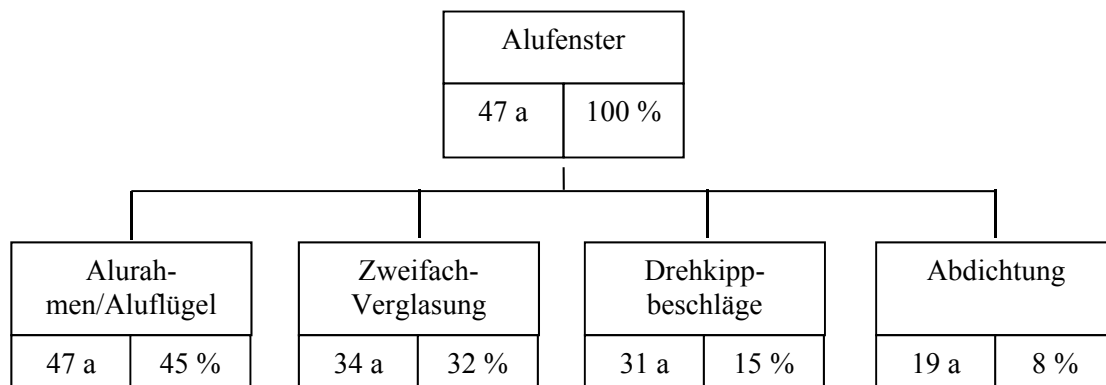


Abbildung E-2: Hierarchiemodell Aluminiumfenster

Standardbauteil Holzfenster mit Dreh-Kipp-Flügel, Zweifachverglasung und Drehkippbeschlägen:

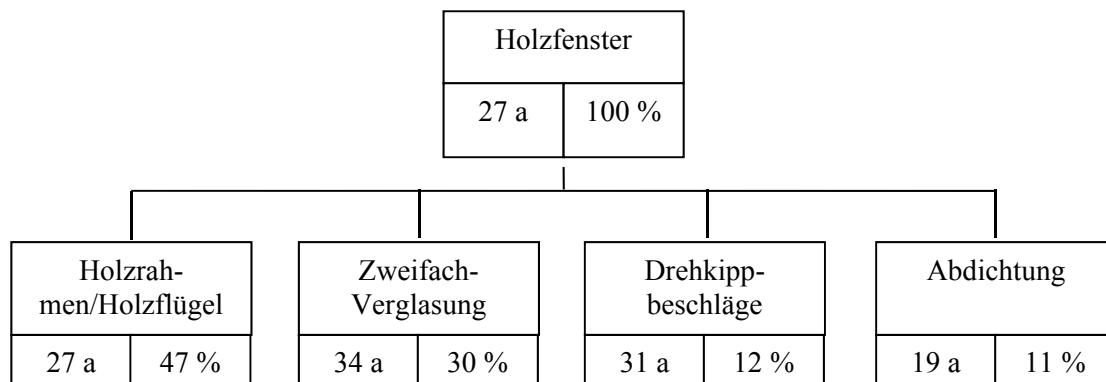


Abbildung E-3: Hierarchiemodell Holzfenster

Standardbauteil Kunststofffenster mit Dreh-Kipp-Flügel, Zweifachverglasung und Drehkippbeschlägen:

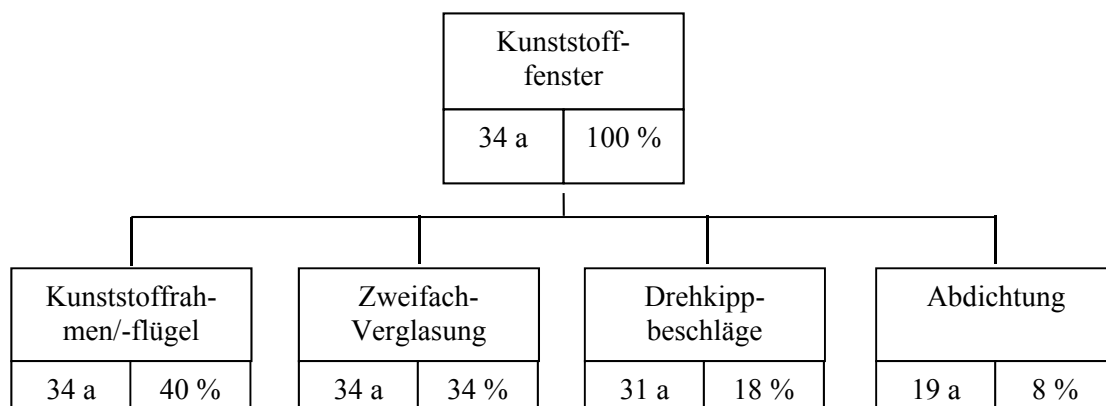


Abbildung E-4: Hierarchiemodell Kunststofffenster

E.2 Türen

Analog den Fenstern wird zunächst ein allgemeines Hierarchiemodell mit gemittelten Lebensdauern und Kostenanteilen als Übersicht abgebildet, bevor im Anschluss fünf verschiedene Standardtüren als Modell dargestellt werden.

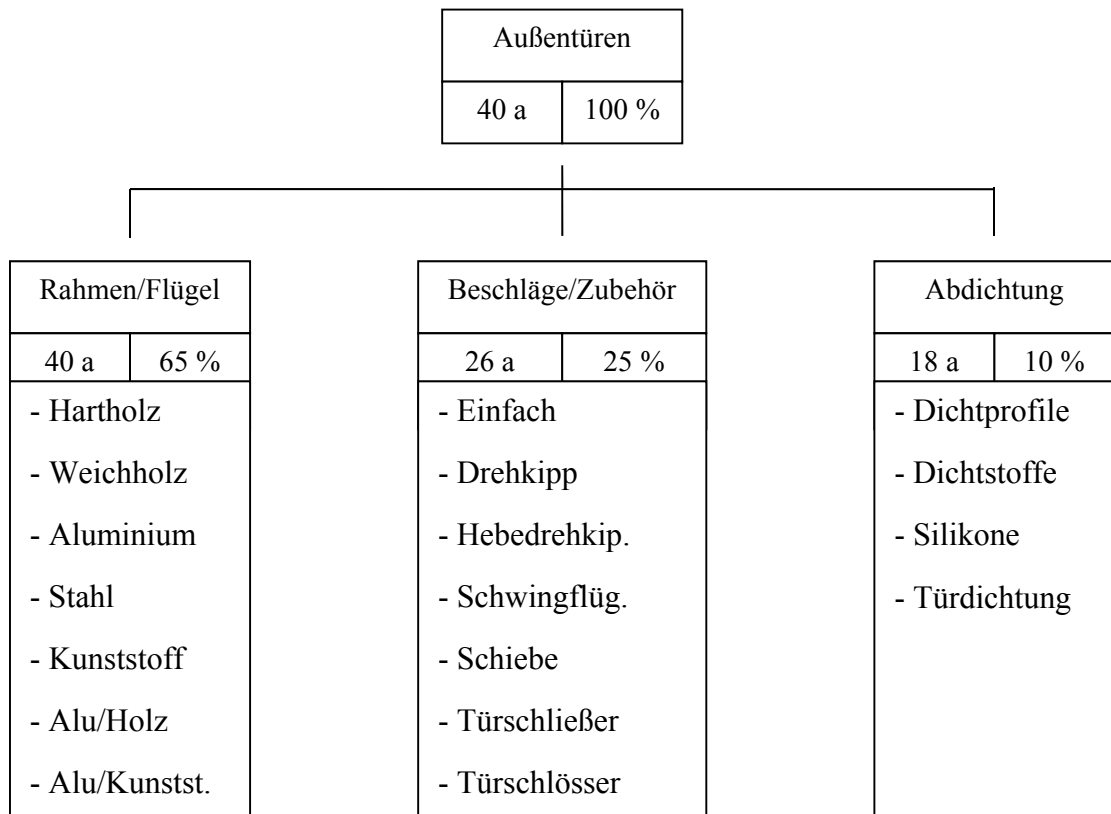


Abbildung E-5: Allgemeines Hierarchiemodell für Außentüren

Standardbauteil Aluminiumtür mit Standardbeschlag, Türschließer und Schloss:

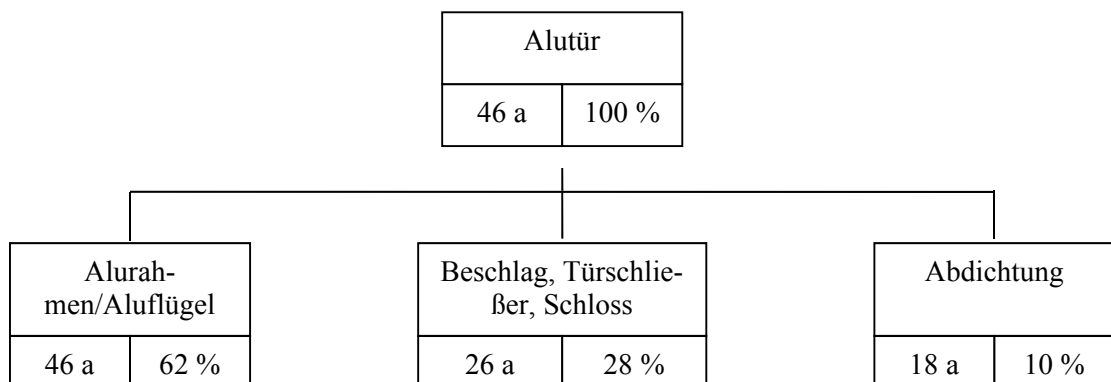


Abbildung E-6: Hierarchiemodell für Aluminiumtüren

Standardbauteil Vollholztür mit Standardbeschlag und Schloss:

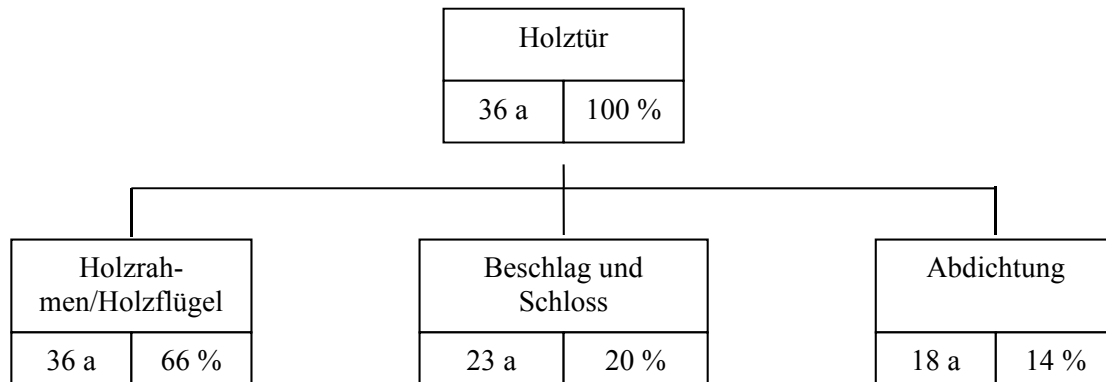


Abbildung E-7: Hierarchiemodell für Vollholztüren

Standardbauteil Vollspanntür mit Standardbeschlag und Schloss:

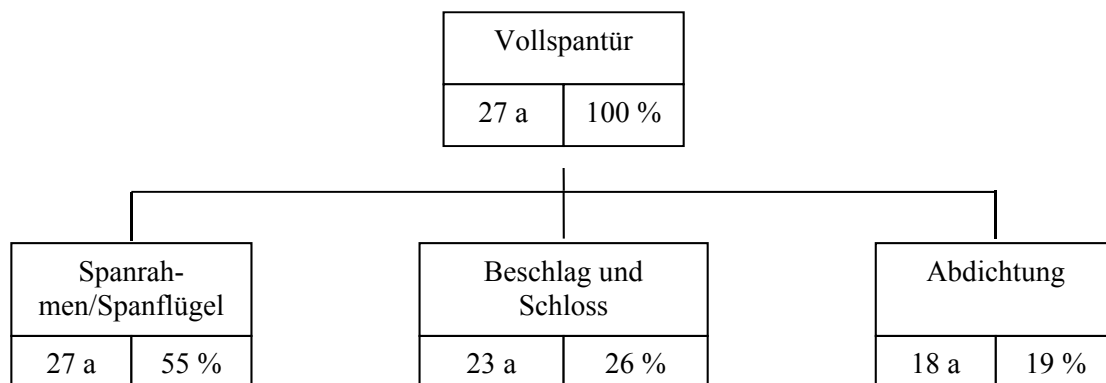


Abbildung E-8: Hierarchiemodell für Vollspanntüren

Standardbauteil Kunststofftür mit Standardbeschlag und Schließanlage:

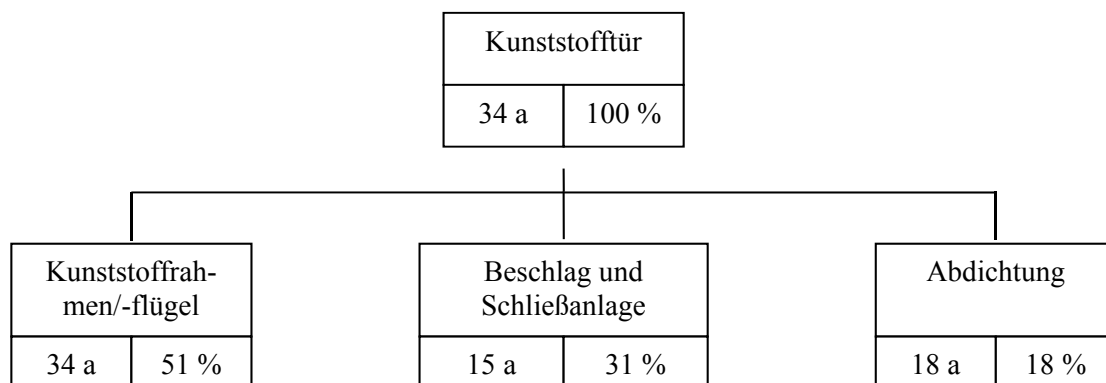


Abbildung E-9: Hierarchiemodell für Kunststofftüren

Standardbauteil Glasrahmentür mit Schwingflügelbeschlägen, Türschließer und Schließanlage:

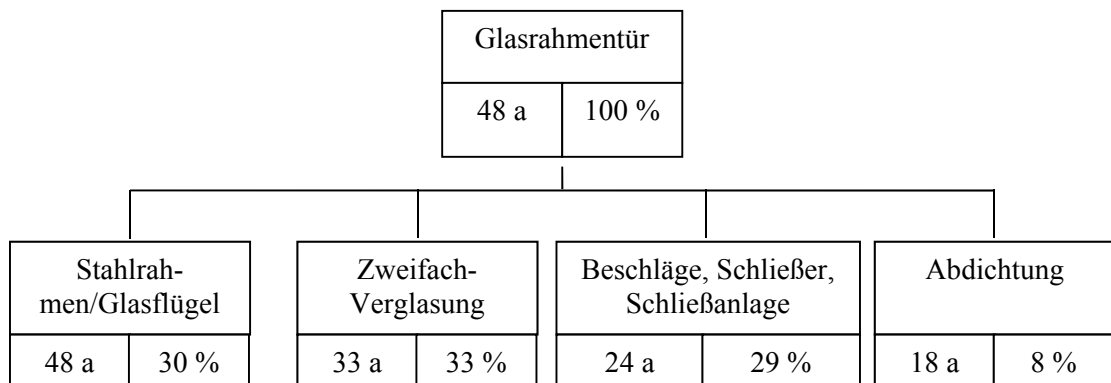


Abbildung E-10: Hierarchiemodell Glasrahmentür

E.3 Außenwandbekleidung, außen

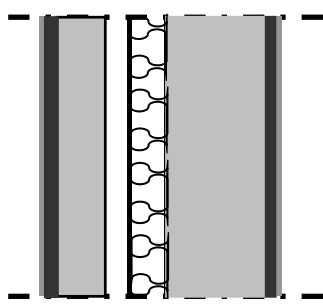
Außenwandbekleidungen werden üblicherweise als Schichtmodelle abgebildet. Ein allgemeines Übersichtsmodell ist hier jedoch nicht möglich, da sich alle Modelle im Aufbau unterscheiden.

Standardbauteil Wärmedämmverbundsystem mit Anstrich, Außenputz, Armierung und Polystyrolämmplatten:



Abbildung E-11: Schichtmodell Wärmedämmverbundsystem

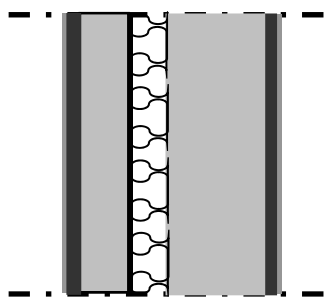
Standardbauteil Zweischalige, hinterlüftete Konstruktion aus Mauerwerk und Polystyrol-dämmplatten:



Außenanstrich	11 %
Außenputz	13 %
Vorsatzschale Mauerwerk	6 %
Luftschicht	0 %
Dämmung	11 %
Mauerwerk	29 %
Innenputz	11 %
Tapete	9 %
Innenanstrich	10 %

Abbildung E-12: Schichtmodell Zweischalige, hinterlüftete Konstruktion

Standardbauteil Zweischalige, nicht hinterlüftete Konstruktion aus Mauerwerk und Polystyrol-dämmplatten:



Außenanstrich	11 %
Außenputz	13 %
Vorsatzschale Mauerwerk	6 %
Dämmung	11 %
Mauerwerk	29 %
Innenputz	11 %
Tapete	9 %
Innenanstrich	10 %

Abbildung E-13: Schichtmodell Zweischalige, nicht hinterlüftete Konstruktion

Standardbauteil Pfosten-Riegel-Fassade aus Unterkonstruktion, Stahl-Glas-Fassade und Abdichtung:

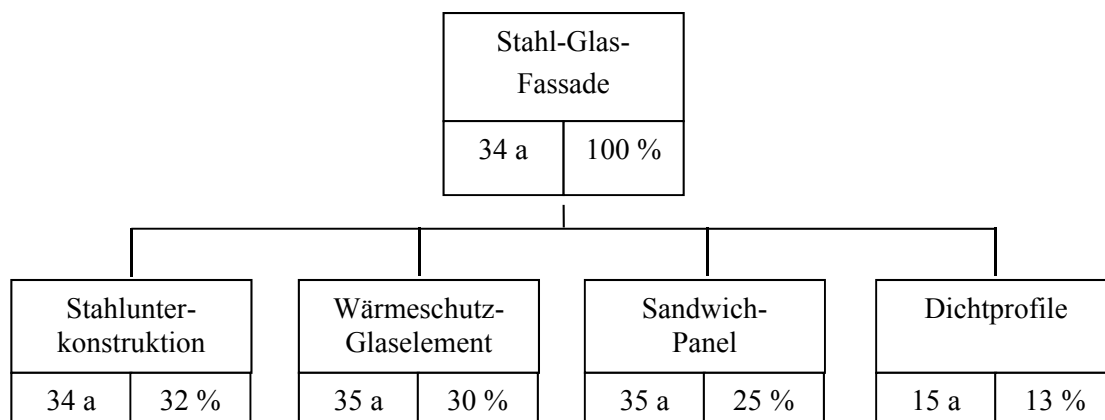


Abbildung E-14: Hierarchiemodell Pfosten-Riegel-Fassade

F.3 Mittlere jährliche Sonnenscheindauer in Deutschland

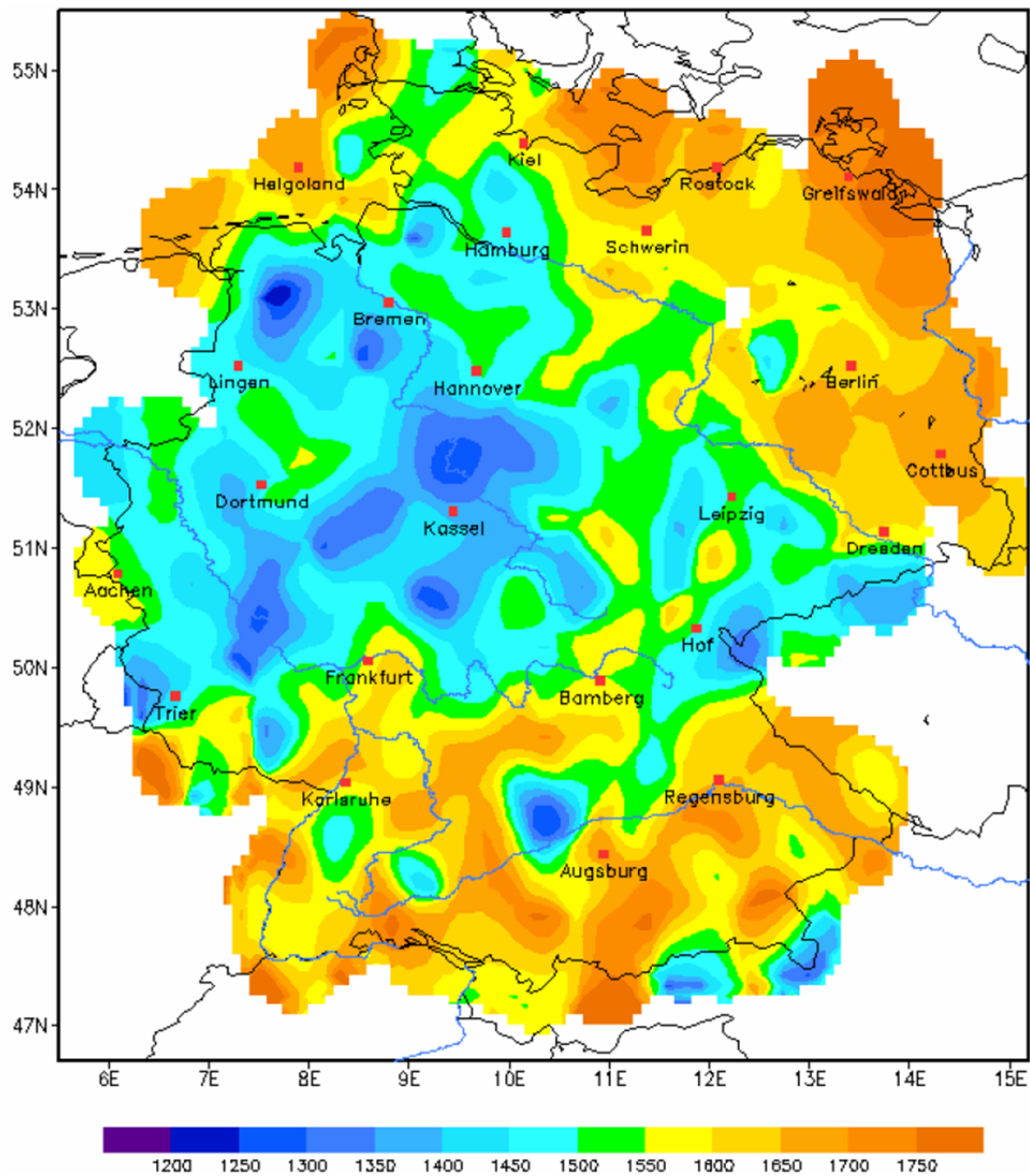


Abbildung F-2: Mittlere Sonnenscheindauer im Jahr [h] für den Zeitraum 1961 – 1990 (Höckmann (2011))

F.4 Mittlere jährliche Niederschlagshöhe in Deutschland

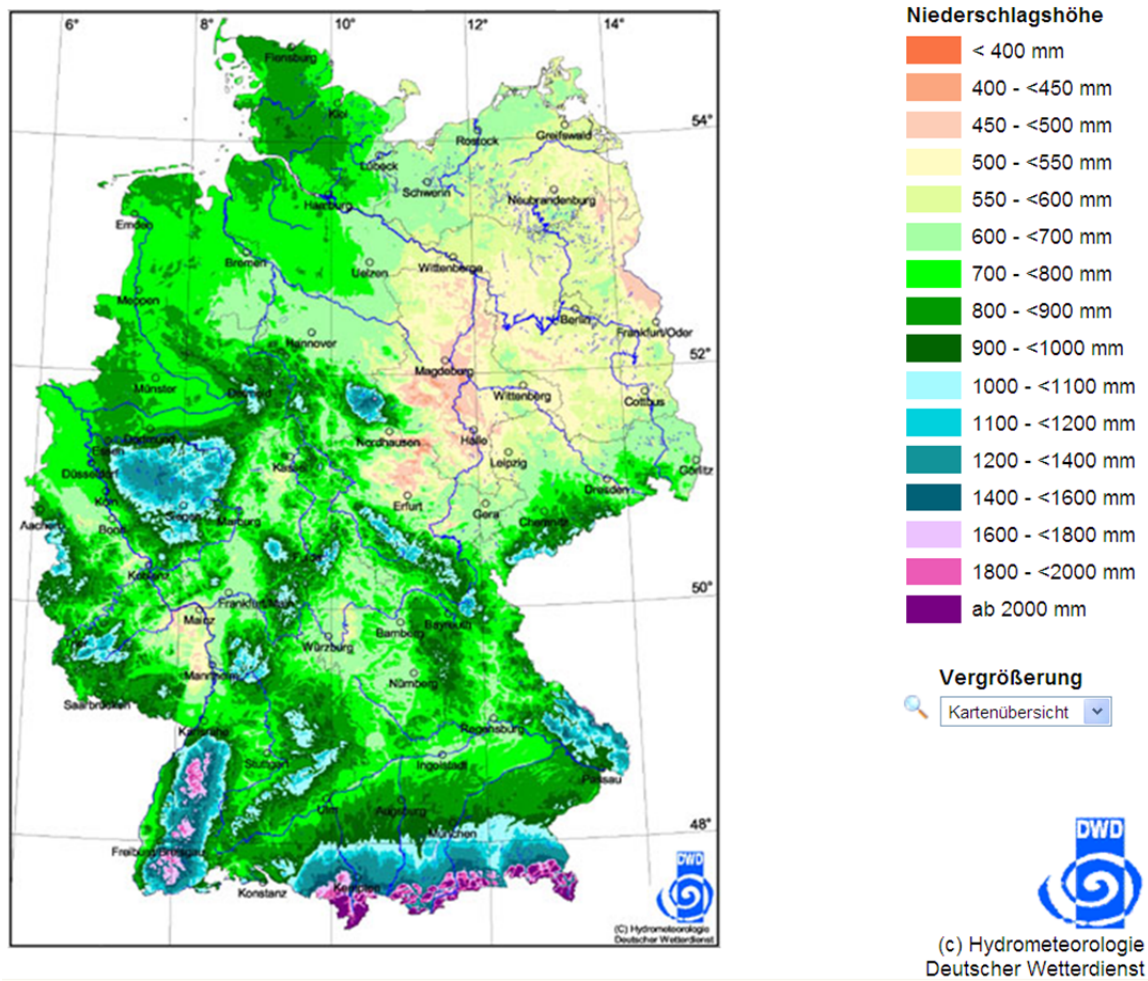


Abbildung F-3: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe für den Zeitraum 1971 – 2000 in mm (Wisny (2011))

F.5 Hagelschlagrisiko nach Schadensätzen

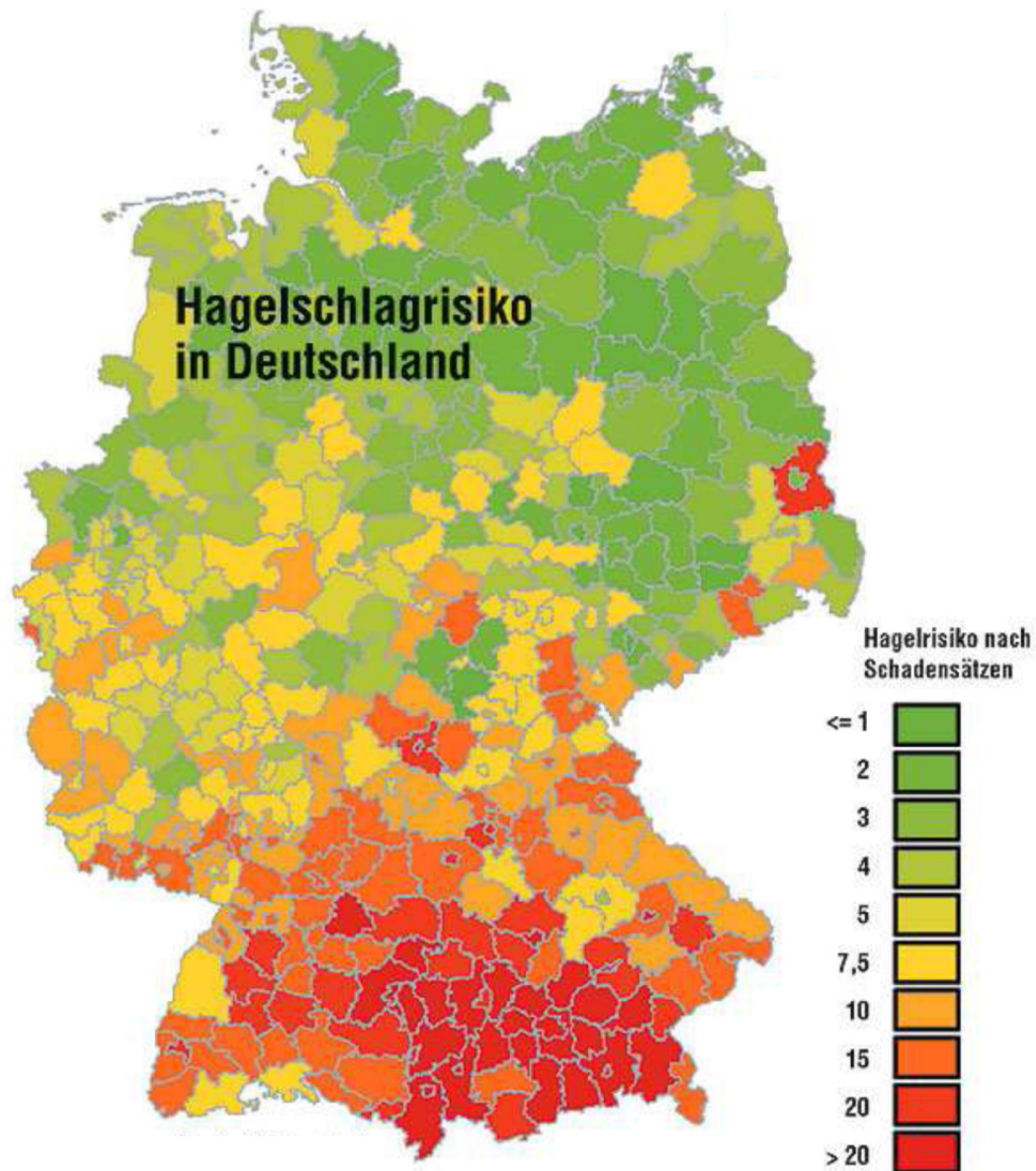
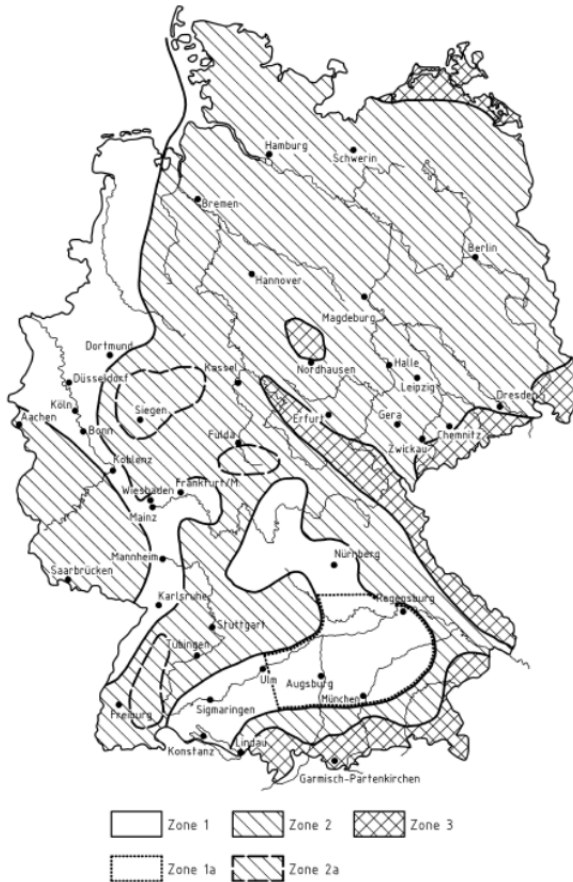


Abbildung F-4: Risikostatistik Hagel 1980-1998 (Bayer Cropscience (2011))

F.6 Schneelastzonen nach DIN 1055-5 (2005)



Charakteristischer Wert der Schneelast s_k auf dem Boden [kN/m²]

Zone 1:

$$s_k = 0,19 + 0,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2$$

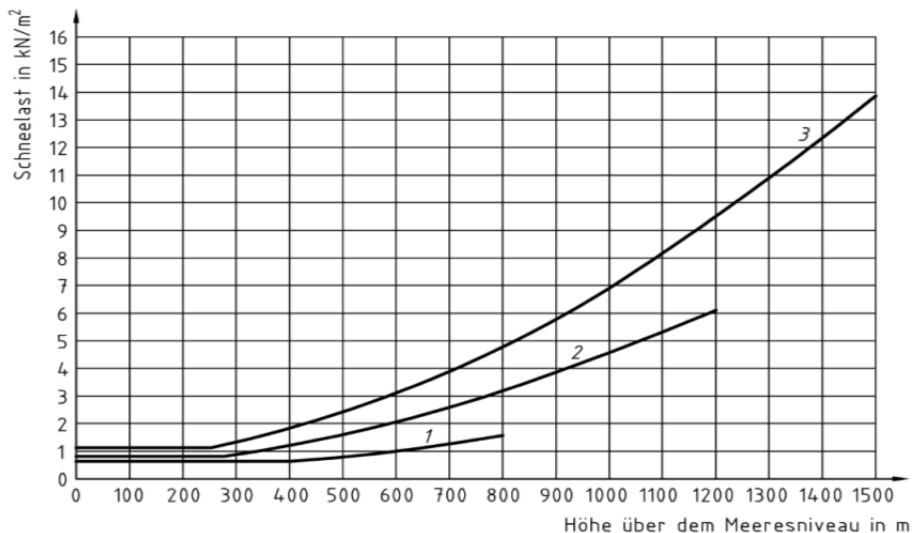
Zone 2:

$$s_k = 0,25 + 1,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2$$

Zone 3:

$$s_k = 0,31 + 2,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2$$

mit A : Geländehöhe über Meeresniveau [m]



Legende

- 1 Zone 1
- 2 Zone 2
- 3 Zone 3

Sockelbeträge (Mindestwerte):

- 0,65 kN/m² (bis 400 m ü. d. M.)
- 0,85 kN/m² (bis 285 m ü. d. M.)
- 1,10 kN/m² (bis 255 m ü. d. M.)

Abbildung F-5: Schneelastzonen und Berechnungshilfen zum charakteristischen Wert der Schneelast nach DIN 1055-5 (2005)

F.7 Erdbebenzonen nach DIN 4149 (2005)



Erdbebenzone	Intensitätsintervalle	Bemessungswert der Bodenbeschleunigung a_g [m/s ²]
0	$6 \leq I < 6,5$	-
1	$6,5 \leq I < 7$	0,4
2	$7 \leq I < 7,5$	0,6
3	$7,5 \leq I$	0,8

Abbildung F-6: Einteilung der Erdbebenzonen in Deutschland nach DIN 4149 (2005)

F.8 Windlastzonen nach DIN 1055-4 (2005)

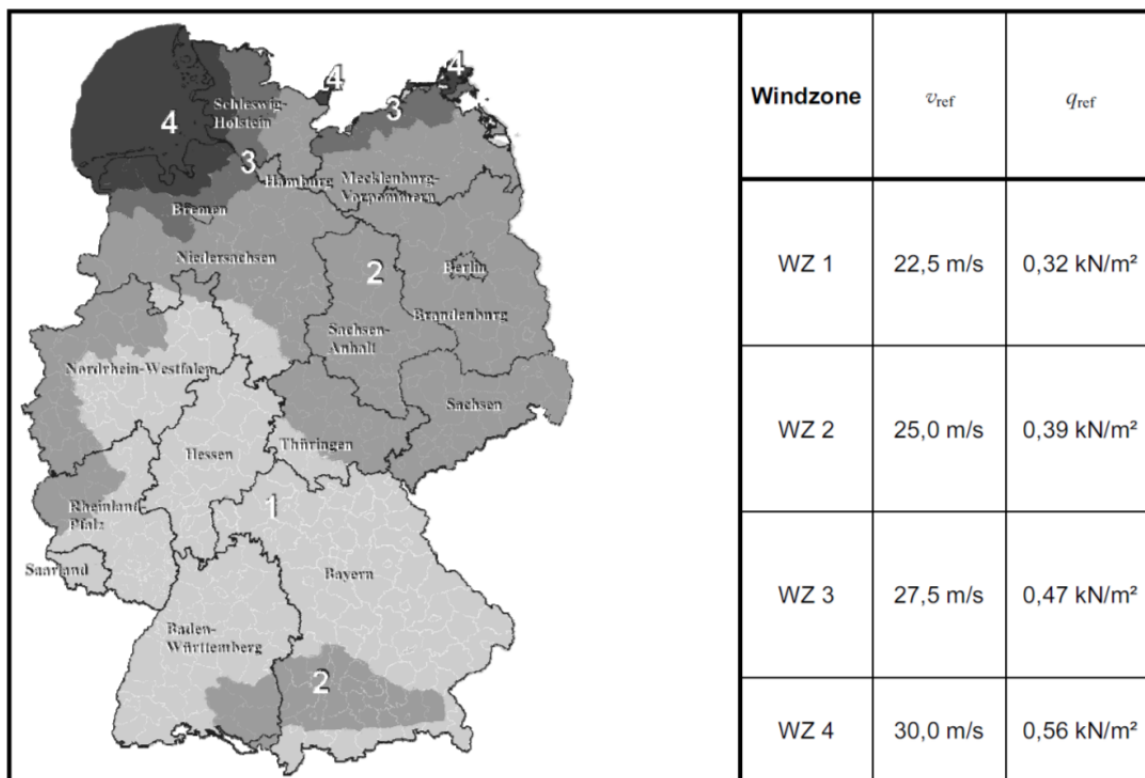


Abbildung F-7: Einteilung der Windlastzonen nach DIN 1055-4 (2005)

G FRAGEBOGEN DER DATENERHEBUNG

G.1 Musterfragebogen der Bauteilgruppe Fenster

Umfrage:

Welche konkreten Einflüsse und Auswirkungen gibt es auf die technische Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen?

Die technische Lebensdauer von Bauteilen hängt von vielen verschiedenen Einflussgrößen ab; sie wird durch die physischen Eigenschaften, das Verhalten der Nutzer oder durch äußere Einwirkungen bestimmt. Unter günstigen Bedingungen und bei sachgerechter Instandhaltung kann die technische Lebensdauer von vielen Bauteilen über hundert Jahre betragen. Es stellt sich die Frage, in welchem Ausmaß sich bestimmte Einflussgrößen auf die Restlebensdauer von Bauteilen auswirken und ob diese Verlängerung/Verkürzung der Lebensdauer direkt in Jahren auszudrücken ist.

Ziel der Untersuchung ist es, eine wissenschaftlich fundierte Aussage über die wesentlichen Einflussgrößen für eine möglichst zuverlässige, projekt- und bausystemspezifische Abschätzung der Lebensdauern zu erhalten.

A Allgemeine Einschätzung

A1: Können Sie Schätzwerte für die Lebensdauer verschiedener Rahmenmaterialien angeben? [Angabe in Jahren]

Hartholz, behandelt:	___	Glas-Holz-Komposit:	___
Weichholz, behandelt:	___	Alu-Holz-Komposit:	___
Stahl, verzinkt und beschichtet:	___	Alu-Kunststoff-Komposit:	___
Kunststoff:	___	Sonstiges:	___
Aluminium:	___		

A2: Abdichtungen und Beschläge gelten als Schwachstellen einer Fensterkonstruktion. Wie sehen Sie die Lebensdauer der jeweiligen Komponenten bei durchschnittlichen Einflüssen und üblichem Gebrauch? [Angabe in Jahren]

Beschläge (allg.):	___	Abdichtung (allg.):	___
Einfache Beschläge:	___	Dichtprofile:	___
Drehkippsbeschläge:	___	Dichtstoffe (Silikone):	___
Hebedrehkippsbeschläge:	___	Verkittung:	___
Schwingflügelbeschläge:	___	Sonstiges:	___
Schiebebeschläge:	___		

A3: Je nach Anforderungen und Nutzung gibt es eine Vielzahl von Verglasungen. Wie bewerten Sie die Haltbarkeit der unterschiedlichen Verglasungen? Glasbruch aufgrund von unplanmäßigen Einwirkungen soll nicht berücksichtigt werden. [Angabe in Jahren]

Einfachverglasung:	_____	Angriffhem. Isolierglas:	_____
2-Scheiben-Wärmeschutzisolierglas:	_____	Sicherheits-Isolierglas:	_____
3-Scheiben-Wärmeschutzisolierglas:	_____	Sonnenschutz-Isolierglas:	_____
Brandschutzisolierglas:	_____	Glasbausteine:	_____
Schallschutzisolierglas:	_____	Sonstiges:	_____

B Einflussgrößen:

Fenster werden in der Nutzung in sehr unterschiedlichem Maß witterungs- und nutzungsbedingt beansprucht. Die Auswirkungen der einzelnen Einflussgrößen auf die Lebensdauer sind nicht immer direkt in Jahren auszudrücken. Sie sind vielmehr durch unterschiedliche Parameter und Interaktionen voneinander abhängig. Geben Sie, wenn möglich eine Einschätzung in Jahren an oder eine Wichtung von großem Einfluss (3 Sterne – XXX) bis zu gar keinem Einfluss (0 Sterne – 0).

B1: Witterungseinflüsse scheinen auf den ersten Blick die größten Beanspruchungen mit sich zu bringen. Wie stark schätzen Sie den Einfluss der einzelnen Beanspruchungen:

Wärme:	_____	Regen:	_____
Kälte:	_____	Schnee:	_____
Frost:	_____	Luftfeuchte:	_____
Wind:	_____	Sonneneinstrahlung:	_____
Sonstige Einwirkungen:	_____		

B2: Sonstige Umwelteinflüsse führen ebenfalls zu einer Verkürzung der Lebensdauer. Wie bewerten Sie den Einfluss dieser Beanspruchungen?

Erschütterungen:	_____	Schadstoffe:	_____
Rauch und Abgase:	_____	Brandeinwirkungen:	_____
Chem./Mech. Luftverschmutzung:	_____	Mech. Beanspruchungen:	_____
Sonstige Einwirkungen:	_____		

B3: Auch aus dem Innenraum können sich Beanspruchungen für die Fenster ergeben. Welche Einflüsse ergeben sich von innen?

Raumklima:	_____	Tauwasserausfall:	_____
------------	-------	-------------------	-------

Lufttemperatur:	___	Zimmerbrand:	___
Abstrahlung von Heizkörpern:	___	Mech. Inanspruchnahme:	___
Luftfeuchte:	___	Anbringung Gardinen, u.ä.:	___
Sonstige Einwirkungen:	___		

B4: Weitere Beanspruchungen für die Fenster ergeben sich durch Einbau und Konstruktion. Wie stark schätzen Sie den Einfluss der folgenden Größen?

Verschmutzung (Regen, Staub):	___	Chem. Zerstörung:	___
Auswaschungen (Reinigungsmittel):	___	Biologische Angriffe:	___
Chem. Kontaktreaktionen:	___	Abnutzung, Abwitterung:	___
Quellen und Schwinden:	___	Formänderungen:	___
Sonstige Einwirkungen:	___		

C Verifizierung an konkreten Projekten

Eine Abschätzung von Lebensdauer kennwerten durch eine Vielzahl von Experten ist eine gute Basis für weitere Untersuchungen. Anhand von Plausibilitätskontrollen können Fehler in der Eingabe oder bei der Auswertung minimiert werden. Trotzdem sind faktisch belegbare Lebensdauerwerte aus konkreten Projekten als Quelle deutlich höher zu werten als reine Erfahrungswerte.

C1: Haben Sie konkrete Projekterfahrung mit der Wartung und Instandhaltung von Fenstern?

O Ja O Nein O Wenig O Viel

C2: Wären Sie bereit, evtl. im Rahmen eines persönlichen Interviews, auch genauere Projektangaben für unsere Untersuchung zur Verfügung zu stellen?

O Ja O Nein O Es kommt darauf an, ob: _____
Wenn ja, können Sie bereits konkrete Projekte nennen?

C3: Wie sehen mögliche Wartungs- bzw. Instandhaltungsmaßnahmen aus und in welchem Rhythmus würden Sie diese empfehlen?

Vielen Dank für Ihre Antworten und Ihre Zeit!

H GESAMTLISTE DER UNTERSUCHTEN BAUTEILE

Tabelle H-1: Gesamtliste der untersuchten Bauteile mit mittlerer Lebensdauer und Fraktilwerten

Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe	Objekt	TLD_{ref} [Jahre]	Unterer 5%-Fraktilwert	Oberer 95%-Fraktilwert
Außentüren und -fenster	Fenster			36	19	59
		Alufenster mit 2-fach Verglasung und Drehkippbeschlägen		44	24	71
		Holzfenster mit 2-fach Verglasung und Drehkippbeschlägen		32	15	57
		Kunststofffenster mit 2-fach Verglasung und Drehkippbeschlägen		34	17	58
		Rahmen und Flügel		39	21	63
			Hartholz, behandelt	44	20	76
			Aluminium	44	25	73
			Weichholz, behandelt	32	15	60
			Stahl, verzinkt und beschichtet	39	22	62
			Kunststoff	34	18	59
			Aluminium-Holz-Komposit	42	29	58
			Aluminium-Kunststoff-Komposit	38	22	58
		Beschläge inkl. Schließmechanismus		29	15	49
			Einfache Beschläge	31	17	53
			Drehkippbeschläge	26	17	37
			Schwingflügelbeschläge	25	15	37
			Schiebebeschläge	25	15	36
		Verglasung		32	15	53
			Einfachverglasung	62	28	108
			2-Sch.-Wärmeschutz-Isolierglas	27	13	48
			3-Sch.-Wärmeschutz-Isolierglas	25	13	42
			Angriffhemmendes Isolierglas	29	17	46
			Brandschutz-Isolierglas	29	17	44
			Schallschutz-Isolierglas	29	16	45
			Sicherheits-Isolierglas	29	17	44
			Sonnenschutz-Isolierglas	28	17	43
			Glasbausteine	36	19	59
		Abdichtung		15	9	22
			Dichtprofile	20	13	28
			Dichtstoffe (Silicone)	14	7	24
			Verkittung	11	5	21
Außentüren und -fenster	Türen			42	26	64
		Vollspantür mit Standardbeschlägen und normalem Schloss		30	17	46
		Alutür mit Standardbeschlägen, Türschließer und normalem Schloss		44	22	72
		Vollholztür mit Standardbeschlägen und normalem Schloss		41	23	62
		Kunststofftür mit Standardbeschlägen und Schließanlage		35	19	58
		Glasrahmentür mit Schwingflügelbeschlägen, Türschließer und Schließanlage		45	26	72
		Standardtüren, außen		42	25	65
			Aluminiumtüren	44	23	80
			Stahltüren, rostfrei	45	25	71

Anhang H - Gesamtliste der untersuchten Bauteile

Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe	Objekt	TLD_{ref} [Jahre]	Unterer 5%-Fraktilwert	Oberer 95%-Fraktilwert
			Aluminium-Holz-Komposit	40	23	62
			Aluminium-Kunststoff-Komposit	43	27	66
			Hartholz	48	27	81
			Weichholz	34	18	56
			Holzwerkstofftüren	30	18	50
			Kunststofftüren	36	19	61
			Stahltüren	41	23	64
			Glastüren / Ganzglas-türen	36	18	63
		Automatiktüren		43	22	73
		Feuchtraumtüren		43	27	64
		Brand-/Schallschutztüren		43	26	64
		Rotationstüren		44	23	76
		Schiebetüren		41	22	68
		Toranlagen		45	25	68
			Aluminiumtore	46	25	73
			Holz-tore	49	27	82
			Kunststoff-tore	37	20	62
			Stahl-tore	39	25	57
		Garagentüren		30	25	38
			Stahlblech	30	21	40
		Türzubehör, außen		30	18	46
			Standardbeschläge	30	14	52
			Schiebebeschläge	26	15	42
			Schwingflügelbe-schläge	25	14	37
			Türschließer	20	11	32
			Türschlösser	25	12	41
			Schließanlage	23	14	35
			Falttürbeschläge	25	15	37
			Panikverschlüsse	21	13	31
			Türanschlagdämpfer	23	12	38
			Türantriebe	15	10	20
			Türdichtungen	20	11	34
		Verglasung		35	25	46
Außenwandbekleidung, außen						
		WDVS bestehend aus Anstrich, Standardputz und Polystyrol-dämmplatten		43	23	65
		WDVS bestehend aus Anstrich, Standardputz und Mineralschaumdämmung		48	20	90
		Zweischalige hinterlüftete Konstruktion aus Mauerwerk und Polystyrol-dämmplatten		46	21	80
		Zweischalige hinterlüftete Konstruktion aus Stahlbeton und Glaswolle-dämmplatten		35	22	53
		Zweischalige nicht hinterlüftete Konstruktion aus Mauerwerk und Polystyrol-dämmplatten		50	21	99
		Zweischalige nicht hinterlüftete Konstruktion aus Stahlbeton und Glaswolle-dämmplatten		45	19	82
		Pfosten-Riegel-Fassade aus Unterkonstruktion, Stahl-Glasfassade und Abdichtung		38	19	69
		Pfosten-Riegel-Fassade aus UK, Beton-Glasfassade, Kerndämmung und Abdichtung		38	18	67
	Wärmedämmverbundsystem			37	19	62
		Dämmschicht		38	21	60
			Polystyrol-dämmplat-ten	41	23	70
			Polyurethandämmplat-ten	42	23	69
			Steinwolle-dämmplat-ten	38	21	62
			Glaswolle-dämmplatten	38	20	63
			Holzfaserdämmplatten	30	15	55
			Holzwoleleichtbau-platten	35	15	64

Anhang H - Gesamtliste der untersuchten Bauteile

Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe	Objekt	TLD_{ref} [Jahre]	Unterer 5%-Fraktilwert	Oberer 95%-Fraktilwert
			Korkplatten	34	16	64
			Schilfdämmplatten	35	13	66
			Mineralschaumdämmplatten	48	21	92
	Vorgehängte hinterlüftete Fassade					
		Dämmschicht		38	24	58
			Steinwollgedämmplatten	42	23	73
			Schaumglasplatten	45	28	67
			Mineralschaumplatte	52	20	102
	Trockenbauweise / Nass-in-nass					
		Kerndämmung		44	20	80
			Polystyrol	42	23	72
			Polyurethan	42	23	68
			Steinwolle	39	21	68
			Glaswolle	39	21	66
			Holzfaserdämmplatten	31	13	58
			Holzwohleleichtbauplatten	35	16	63
			Holzwohle	35	16	66
			Kork	34	15	63
			Holzspäne	36	17	62
			Seegras	36	14	69
			Wiesengras	34	14	62
			Flachs	32	15	56
			Hanf	36	17	66
			Schafwolle	35	14	66
			Zellulose	31	13	62
			Kokos	36	17	63
			Strohballen	36	15	72
			Roggengranulat	36	17	66
			Blähglasgranulat	51	22	93
			Blähtongranulat	50	22	92
			Blähschiefergranulat	51	24	92
			Leichtlehmischung	35	15	66
			Vakuumdämmpaneele	32	12	67
	Hinterlüftete Vorsatzschale					
		Dämmschicht		36	24	52
			Polystyrolgedämmplatten	40	23	61
			Polyurethandämmplatten	39	21	61
			Steinwollgedämmplatten	37	23	53
			Glaswollgedämmplatten	36	22	56
			Vakuumdämmpaneele	28	14	48
	Nicht hinterlüftete Vorsatzschale					
		Dämmschicht		40	11	96
			Polystyrol	53	21	104
			Polyurethandämmplatten	54	21	106
			Steinwolle	44	18	85
			Glaswolle	45	19	86
			Vakuumdämmpaneele	28	15	47
			Blähglasgranulat	71	33	133
			Blähtongranulat	69	29	132
			Blähschiefergranulat	71	30	129
	Außenliegende Dämmung			47	16	99
			Calciumsilikatplatten	59	30	104
			Mineralschaumdämmplatten	45	21	83
	Putz			38	18	70
		auf monolithischer Tragschicht		38	20	65
			Luftkalkmörtel	39	19	72
			Wasserkalkmörtel	40	20	68

Anhang H - Gesamtliste der untersuchten Bauteile

Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe	Objekt	TLD_{ref} [Jahre]	Unterer 5%-Fraktilwert	Oberer 95%-Fraktilwert
			Hydraulischer Kalkmörtel	40	19	68
			Hochhydraulischer Kalkmörtel	40	20	67
			Mörtel mit Putz- und Mauerbinder	40	20	66
			Kalkzementmörtel	40	20	65
			Zementmörtel mit Zusatz von Luftkalk	40	20	66
			Zementmörtel	40	19	73
			Silikatputze	35	15	71
			Kunstharzputze	31	14	57
			Silikonharzputze	31	14	55
			Sanierputzsysteme	35	16	61
			Mineralische Leichtputzsysteme	39	20	67
		auf Wärmedämmung		35	18	55
			Mineralische Putzsysteme	38	20	65
			Silikatische Putzsysteme	37	17	63
			Kunstharzputzsysteme	34	18	55
			Silikonharzputzsysteme	34	17	60
	Keramische Bekleidung			42	19	73
		auf Wärmedämmung	Fliesen	43	20	74
			Klinkerriemchen	37	21	60
	Unterkonstruktion					
		Pfosten-Riegel-Fassade		32	20	47
		Faserzement-Fassade		34	19	53
		Blech-Fassade		39	23	61
		Vorgehängte hinterlüftete Fassade		44	20	77
			Edelstahl	78	26	178
			Aluminium	51	21	96
			Holz	33	17	56
	Sonstige Bekleidung					
		Vorgehängte hinterlüftete Fassade		44	21	76
			Weichholz, behandelt	34	13	65
			Weichholz, unbehandelt	33	12	69
			Hartholz, unbehandelt	39	15	74
			Hartholz, behandelt	49	19	98
			Holzzement	45	18	86
			Faserzement	48	21	89
			Stahl, verzinkt	40	22	67
			Stahl, verzinkt und beschichtet	34	15	62
			Stahl, kunststoffummantelt	34	14	61
			Stahl, nicht rostend	42	22	72
			Kupferblech	52	22	96
			Zink	44	18	84
			Naturstein	60	31	107
			Stein-Leichtelemente	52	31	78
			HPL-Platten	42	21	72
			Kunststoff	37	20	62
			Glas	51	18	98
			Tonziegel	72	35	124
			Aluminium	40	20	68
		Kunststoffstegplatten transparent	Acrylglasplatten	39	24	59
			Polycarbonatplatten	35	21	52
	Vorsatzschale					
		Konstruktion	Kalksandstein	58	34	87
			Tonziegel	81	35	150

Anhang H - Gesamtliste der untersuchten Bauteile

Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe	Objekt	TLD_{ref} [Jahre]	Unterer 5%-Fraktilwert	Oberer 95%-Fraktilwert
			Verfugung Sichtmauerwerk	36	22	57
			Tonklinker	85	38	152
			Sichtbeton	65	35	110
			Fassadenfestverglasung	47	29	70
	Außenanstriche			11	4	23
		auf Putz		15	7	27
			Kaseinfarbe	11	5	20
			Weißzementfarbe	15	9	24
			Dispersionsfarbe	15	7	29
			Dispersions-Silikatfarbe	15	7	26
			Silikonharzfarbe	14	7	23
			Silikatfarbe	15	6	27
			Polymerisatharzfarben	15	9	25
			Lasur	9	3	18
		auf Mauerwerk		10	4	19
		auf Beton		14	5	29
			Anstrich	9	4	15
		Anstrichsysteme	Antigraffiti-schutz	9	5	16
		auf Holz		8	3	17
			Holzlasuren	5	2	10
			Holzfarben	6	3	11
			Holzlacke	6	2	11
			Holzöle/-wachse	8	3	16
Sonnenschutz	Jalousien, Rolläden					
		außenliegend		25	12	42
			Holz	28	14	47
			Kunststoff	22	11	39
			Stahl	21	9	39
			Aluminium	29	13	51
		innenliegend		12	6	20
		innenliegend, elektrisch	Verdunklungsanlage	11	7	17
		innenliegend, manuell	Sonnenstoren, Stoffersatz	13	6	21
		innenliegend	Gurte für Sonnenstore und Rolläden	8	5	11
		in Verglasung	Rolläden	16	11	22
Innentüren und -fenster	Türen (innen)			49	27	82
		Standardtüren		62	38	94
			Aluminiumtüren	58	37	84
			Stahltüren, rostfrei	62	39	92
			Hartholz	54	33	83
			Weichholz	60	43	82
			Holzwerkstofftüren	52	27	81
			Kunststofftüren	50	35	69
			Stahltüren	56	32	90
		Türen , Zubehör		28	17	43
			Standardbeschläge	37	16	78
			Schlösser	30	17	48
			Schiebebeschläge	31	18	51
Innenwandbekleidungen	Innenbekleidungen			31	13	59
		Standard-Bekleidungen		49	22	85
			Gipskartonplatten	48	23	88
			Holz	48	26	86
			Holzwerkstoff	54	32	84
			Mehrschichtleichtbauplatten	61	37	89
		Keramische Fliesen und Platten		48	21	90
		Natursteinbekleidungen		70	37	116
		Kunststeinbekleidungen		58	37	82

Anhang H - Gesamtliste der untersuchten Bauteile

Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe	Objekt	TLD_{ref} [Jahre]	Unterer 5%-Fraktilwert	Oberer 95%-Fraktilwert
		Tapeten		12	6	20
		Metallbekleidungen		62	39	93
		Spezial-Bekleidungen		27	9	67
			Brandschutz	36	18	60
			Schallschutz (Akustikputz)	35	16	64
			Feuchteresistente Bekleidungen	37	16	71
	Innenputze					
		Standard-Innenputze		50	28	75
			Anhydritputz	52	31	79
			Celluloseputz	46	28	68
			Gipsputz	49	26	78
			Kalkputz	47	25	76
			Kalkgipsputz	49	25	89
			Kalkzementputz	49	31	78
			Kunstharzputz	49	26	81
			Lehmputz	52	33	77
		mineralische Deckputze		52	33	78
			Trasskalkputz	52	34	78
			Trasszementputz	50	27	82
			Zementputze	50	29	77
	Oberflächenbehandlung und -schutz			12	6	23
		Innenanstriche		12	5	21
			Kalkfarbe	11	4	19
			Leimfarbe	12	5	20
			Kaseinfarbe	12	5	25
			Dispersionsfarbe	12	6	21
			Silikonharzfarbe	11	6	19
			Silikatfarbe	14	7	26
			Lasur	16	8	26
			Öl- und Lackfarbe	16	9	26
Elementierte Innenwände	nicht tragende Wände			25	16	37
		mobile Wände	Faltschiebewand / mobile Trennwände	23	16	33
		Sanitärkabinen	Umkleidekabinen	25	16	36
		Sanitärtrennwände	Duschtrennwände	26	15	40
			Toilettentrennwände	27	16	42
			Urinaltrennwände	27	16	42
Decken						
	Bodenaufbauten			44	18	81
		Estriche unter Oberböden		48	22	94
		Fließestriche	Anhydrit	55	25	103
			Gussasphalt	56	27	102
			Steinholz	60	27	103
			Zement	54	23	102
			Trittschalldämmung	50	23	88
		Trockenestriche	Gipsfaserplatten	51	28	86
			Gipskartonplatten	51	26	81
			Holzwerkstoffplatten	51	26	87
		Doppelböden		36	15	74
			Aluminiumplatten	63	35	96
			Gipsfaserplatten	64	38	103
			Holzwerkstoffplatten	64	37	98
			Stahlplatten	65	38	101
		Hohlraumböden		63	35	100
			Gipsfaserplatten	60	32	99
			Holzwerkstoffplatten	62	33	100
		Hohlraumbodenstützen	Stahl, verzinkt	62	35	94
		Schwingböden		41	23	67
			Holz	41	21	68
			Kunststoff	40	23	61

Anhang H - Gesamtliste der untersuchten Bauteile

Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe	Objekt	TLD _{ref} [Jahre]	Unterer 5%-Fraktilewert	Oberer 95%-Fraktilewert
	Bodenbeläge					
		glatte Beläge		31	14	55
			Kautschuk	22	13	35
			PVC	22	10	38
			Kork	18	8	31
			Kunststoff-Parkett	19	9	35
			Linoleum	20	10	35
			Laminat	14	6	26
			Holzparkett	46	17	93
			Holzdielen	46	21	83
		Teppichböden		11	5	19
			Baumwolle	11	5	19
			Sisal	11	5	19
			Synthetikfaser	11	6	19
			Wolle	11	5	21
		Schmutzfangbeläge		8	5	12
			Baumwolle	8	4	13
			Jute	8	5	14
			Kokos	9	5	16
			Kunststoff	10	4	18
			Sisal	8	4	15
			Synthetikfaser	10	4	18
		Steinbeläge		59	27	107
		Natursteinbeläge	Sedimentgestein	67	29	115
			Metamorphgestein	69	30	135
			Magmatisches Gestein	63	29	114
		Kunststeinbeläge	Betonstein, Kunstharz und Terrazzoasphalt	58	26	109
			Klinkerplatten	47	23	87
		Fugenlose Bodenbeläge	Kunstharz, Quarz und Terrazzo	52	21	97
		Keramische Fliesen und Platten		48	22	90
	Bodenschutz/Beschichtung			7	3	14
		Bodenanstriche		6	4	9
			Versiegelung	8	4	14
			Imprägnierung	5	2	9
			Epoxidharzbeschichtung	11	6	20
Deckenbekleidungen						
	Deckenbekleidungen			40	17	71
		Tapeten		9	5	14
			überstreichbar	8	4	12
			nicht überstreichbar	10	5	16
		Putz		44	19	84
		Holzbekleidungen		55	28	98
		Trockenbau		45	25	74
		Metallbekleidungen		48	25	85
		Sonderkonstruktionen		39	19	73
			Kunststoffplatten	40	22	63
			Brandschutz-Unterdecken	37	23	56
			Schallabsorber	37	22	55
			Akustikschaum	30	13	58
			Akustikdecken	33	13	70
			Akustik Elemente	30	12	56
			Mineralfaserplatten	42	24	67
			Kunststoff	42	22	67
Dachkonstruktionen						
Dachfenster, Dachöffnungen	Belichtungsöffnungen			31	16	54
		Dachausstiege und Luken		36	17	63
			Stahl, verzinkt	39	20	66
			Kunststoff	33	13	58

Anhang H - Gesamtliste der untersuchten Bauteile

Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe	Objekt	TLD_{ref} [Jahre]	Unterer 5%-Fraktilwert	Oberer 95%-Fraktilwert
		Dachflächenfenster		30	16	51
			Stahl, verzinkt	46	25	73
			Holz, behandelt	31	19	47
			Kunststoff	35	21	51
			Aluminium	32	14	59
			Aluminium-Holz-Komposit	29	15	54
			Aluminium-Kunststoff-Komposit	31	17	48
Dachbeläge	Befestigungs- und Verbindungsmittel			44	20	82
		Klemmverbindungen	Schwerlastdübel / Systeme	46	23	80
		Klebeverbindungen	Klebebewehrungen / Systeme	46	21	80
	Deckschichten			45	26	78
		Halme		37	21	58
			Reet	31	18	48
		Platten und Schuppen		46	25	76
		Ebene Schuppen	Holzschindeln	37	19	60
			Schiefer	68	33	121
			Schiefergranulat	38	22	58
			Faserzement	38	22	59
			Bitumenschindeln	22	13	35
			Ziegel	51	22	89
			Beton	44	22	76
		Ebene Platten	Glas	39	22	62
			Faserzement-Wellplatten	38	21	62
			Bitumen-Wellplatten	32	13	62
			Aluminium	35	20	53
			Stahl, verzinkt	24	11	43
			Stahl, verzinkt und beschichtet	43	26	65
			Stahl, nicht rostend	49	26	84
			Stahl, Trapezblech	53	28	86
			Kupferblech	67	33	114
			Zink	33	14	65
		Metallbanddeckungen		44	24	74
			Aluminiumblech	41	19	69
			verzinktes Stahlblech	25	11	46
			verzinktes und beschichtetes Stahlblech	43	26	64
			Stahl, nicht rostend	50	26	82
			Kupfer	68	34	116
			Zink	33	13	64
			Blei	36	16	68
	Entwässerung					
		Dachrinnen/Regenfallrohre		40	16	87
			Aluminium	56	25	107
			verzinkter Stahl	20	8	38
			verzinkter und beschichteter Stahl	54	23	101
			Stahl, nicht rostend	45	19	86
			Kupfer	62	29	116
			Zink	31	15	53
			Kunststoff	17	8	28
		Dachabläufe		29	10	63
			Aluminium	39	16	74
			Stahl, verzinkt	27	15	43
			Stahl, nicht rostend	36	19	60
			Kupfer	48	21	95
			Zink	29	15	55
			Kunststoff	21	12	37

Anhang H - Gesamtliste der untersuchten Bauteile

Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe	Objekt	TLD_{ref} [Jahre]	Unterer 5%-Fraktilewert	Oberer 95%-Fraktilewert
Dachbekleidungen						
	Abdichtung außen	Abdichtmassen		24	12	42
			Asphaltmastix unterhalb der Dämmung	33	14	63
			Asphaltmastix oberhalb Dämmung mit schwerer Schutzschicht	28	11	52
			Asphaltmastix oberhalb Dämmung mit leichter Schutzschicht	22	9	42
			Flüssigabdichtung unterhalb der Dämmung	30	15	48
			Flüssigabdichtung oberhalb Dämmung mit schwerer Schutzschicht	28	12	49
			Flüssigabdichtung oberhalb Dämmung mit leichter Schutzschicht	24	10	48
			Gussasphalt unterhalb der Dämmung	32	13	65
			Gussasphalt oberhalb Dämmung mit schwerer Schutzschicht	28	12	53
			Gussasphalt oberhalb Dämmung mit leichter Schutzschicht	23	10	45
		Abdichtungsbahnen				
			Bitumenbahnen unterhalb der Dämmung	27	16	41
			Bitumenbahnen oberhalb Dämmung mit schwerer Schutzschicht	25	10	47
			Bitumenbahnen oberhalb Dämmung mit leichter Schutzschicht	22	8	45
			Kunststoffbahnen unterhalb der Dämmung	28	16	45
			Kunststoffbahnen oberhalb Dämmung mit schwerer Schutzschicht	27	14	46
			Kunststoffbahnen oberhalb Dämmung mit leichter Schutzschicht	24	12	41
			Elastomerbahnen unterhalb der Dämmung	31	17	49
			Elastomerbahnen oberhalb Dämmung mit schwerer Schutzschicht	29	16	51
			Elastomerbahnen oberhalb Dämmung mit leichter Schutzschicht	24	12	39
			Foliendach	22	9	44
	Schutzschichten					
		Schwere Schutzschicht	Kies	28	14	48

Anhang H - Gesamtliste der untersuchten Bauteile

Kostengruppe nach DIN 276-1	Hauptgruppe	Untergruppe	Objekt	TLD_{ref} [Jahre]	Unterer 5%-Fraktilwert	Oberer 95%-Fraktilwert
			intensive Begrünung	29	14	47
			extensive Begrünung	37	19	66
		Dampfdichte Innendämmung				
			Dampfsperrfolien	36	17	63
			Dampfbremse	32	16	63
			Spezialpapier	38	18	65
			dampfdiffusionsoffene Kunststofffolien	29	14	51
		Winddichtung		44	22	82
			PVC-Folie	50	20	98
	Dachdämmung					
		Zwischensparren-dämmung		33	19	54
			Polystyrol	33	18	53
			Polyurethan	34	19	53
			Steinwolle	37	21	60
			Glaswolle	37	20	59
		Aufdachdämmung		36	22	54
			Glaswollplatten	38	22	61
			Steinwollplatten	38	22	60
			extrudierte Polystyrolplatten	35	20	58
			expandierte Polystyrolplatten	35	19	54
			Polyurethanplatten	39	22	62
Dächer, Sonstiges	Schutzanlagen			31	12	59
		Blitzschutzanlagen	Stahl, verzinkt	32	13	59
		Taubenvergrämung	Stahl, verzinkt	32	13	63
		Absturzsicherungen	Stahl, verzinkt	26	15	39

I UMWELTWIRKUNGEN VON WANDBEKLEIDUNGEN UND BODENBELÄGEN

H.1 Wandbekleidungen

Tabelle I-1: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf Gipskartonleichtbauwänden unter Berücksichtigung der Lebensdauer

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Gipskartonleichtbauwand			
	Fliese (kein Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (kein Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	7,60E+01	1,03E+01	2,58E+01	8,89E+01
Primärenergie regenerierbar [MJ]	1,45E+00	1,28E+01	4,30E+01	1,55E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	3,31E-02	3,82E-03	9,26E-03	3,43E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	5,03E+00	-2,48E-02	-6,26E-01	-1,08E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	9,77E-03	4,11E-03	8,79E-03	8,26E-03
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	7,11E-04	5,90E-04	1,02E-03	1,01E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	9,23E-04	5,42E-04	1,70E-03	1,23E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	1,94E-07	5,88E-08	1,73E-07	4,70E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	3,00E-01	3,50E-01	1,74E+00	4,00E-01

Tabelle I-2: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf Gipskartonleichtbauwänden unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Gipskartonleichtbauwand			
	Fliese (1x Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (1x Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	2,07E+02	1,03E+01	2,58E+01	1,76E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	5,13E+00	1,28E+01	4,30E+01	3,09E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	9,11E-02	3,82E-03	9,26E-03	6,73E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	1,41E+01	-2,48E-02	-6,26E-01	-2,10E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	2,73E-02	4,11E-03	8,79E-03	1,75E-02
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	2,26E-03	5,90E-04	1,02E-03	2,05E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	3,33E-03	5,42E-04	1,70E-03	2,60E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	4,96E-07	5,88E-08	1,73E-07	9,55E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	9,00E-01	3,50E-01	1,74E+00	1,00E+00

Anhang I - Umweltwirkungen von Wandbekleidungen und Bodenbelägen

Tabelle I-3: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf Ziegelmauerwerk mit Zementputz unter Berücksichtigung der Lebensdauer

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Ziegelmauerwerk mit Zementputz			
	Fliese (kein Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (kein Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	7,84E+01	9,75E+00	8,91E+01	8,79E+01
Primärenergie regenerierbar [MJ]	1,44E+00	1,28E+01	1,49E+00	1,52E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	3,41E-02	3,56E-03	3,80E-02	3,39E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	5,12E+00	-5,54E-02	4,00E+00	-1,05E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	9,96E-03	3,79E-03	5,91E-02	8,24E-03
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	7,11E-04	5,28E-04	1,06E-02	1,00E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	9,30E-04	5,36E-04	9,65E-04	1,21E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	1,99E-07	5,70E-08	2,64E-07	4,64E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	3,13E-01	3,63E-01	1,81E+00	4,17E-01

Tabelle I-4: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf Ziegelmauerwerk mit Zementputz unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Ziegelmauerwerk mit Zementputz			
	Fliese (1x Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (1x Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	2,01E+02	9,75E+00	8,91E+01	1,74E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	7,00E+00	1,28E+01	1,49E+00	3,04E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	8,67E-02	3,56E-03	3,80E-02	6,67E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	1,67E+01	-5,54E-02	4,00E+00	-2,05E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	3,24E-02	3,79E-03	5,91E-02	1,75E-02
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	2,73E-03	5,28E-04	1,06E-02	2,05E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	4,20E-03	5,36E-04	9,65E-04	2,57E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	5,63E-07	5,70E-08	2,64E-07	9,45E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	1,46E+00	3,63E-01	1,81E+00	1,04E+00

Tabelle I-5: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf Ziegelmauerwerk mit Gipsputz unter Berücksichtigung der Lebensdauer

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Ziegelmauerwerk mit Gipsputz			
	Fliese (kein Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (kein Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	7,82E+01	1,07E+01	8,40E+01	8,82E+01
Primärenergie regenerierbar [MJ]	1,44E+00	1,29E+01	1,41E+00	1,52E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	3,41E-02	3,97E-03	3,59E-02	3,40E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	5,12E+00	-1,22E-02	3,77E+00	-1,05E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	9,95E-03	4,28E-03	5,54E-02	8,29E-03
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	7,12E-04	6,22E-04	9,99E-03	1,01E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	9,31E-04	5,46E-04	9,10E-04	1,22E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	1,98E-07	5,98E-08	2,49E-07	4,65E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	3,13E-01	3,63E-01	1,81E+00	4,17E-01

Tabelle I-6: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf Ziegelmauerwerk mit Gipsputz unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Ziegelmauerwerk mit Gipsputz			
	Fliese (1x Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (1x Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	1,60E+02	1,07E+01	8,40E+01	1,75E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	3,00E+00	1,29E+01	1,41E+00	3,04E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	6,96E-02	3,97E-03	3,59E-02	6,69E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	1,11E+01	-1,22E-02	3,77E+00	-2,04E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	2,21E-02	4,28E-03	5,54E-02	1,76E-02
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	1,69E-03	6,22E-04	9,99E-03	2,06E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	2,09E-03	5,46E-04	9,10E-04	2,58E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	4,02E-07	5,98E-08	2,49E-07	9,47E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	8,44E-01	3,63E-01	1,81E+00	1,04E+00

Anhang I - Umweltwirkungen von Wandbekleidungen und Bodenbelägen

Tabelle I-7: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf Kalksandsteinmauerwerk mit Zementputz unter Berücksichtigung der Lebensdauer

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Kalksandsteinmauerwerk mit Zementputz			
	Fliese (kein Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (kein Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	5,83E+01	1,06E+01	1,02E+02	9,44E+01
Primärenergie regenerierbar [MJ]	1,26E+00	1,37E+01	1,72E+00	1,62E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	2,53E-02	3,87E-03	4,38E-02	3,64E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	3,99E+00	-5,11E-02	4,60E+00	-1,12E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	7,74E-03	4,13E-03	6,80E-02	8,87E-03
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	5,95E-04	5,79E-04	1,22E-02	1,08E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	7,59E-04	5,76E-04	1,11E-03	1,30E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	1,52E-07	6,14E-08	3,04E-07	4,97E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	3,01E-01	3,87E-01	1,94E+00	4,46E-01

Tabelle I-8: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf Kalksandsteinmauerwerk mit Zementputz unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Kalksandsteinmauerwerk mit Zementputz			
	Fliese (1x Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (1x Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	1,63E+02	1,06E+01	1,02E+02	1,87E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	6,73E+00	1,37E+01	1,72E+00	3,25E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	7,00E-02	3,87E-03	4,38E-02	7,16E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	1,48E+01	-5,11E-02	4,60E+00	-2,19E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	2,90E-02	4,13E-03	6,80E-02	1,88E-02
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	2,64E-03	5,79E-04	1,22E-02	2,21E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	4,00E-03	5,76E-04	1,11E-03	2,76E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	4,70E-07	6,14E-08	3,04E-07	1,01E-06
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	1,40E+00	3,87E-01	1,94E+00	1,11E+00

Tabelle I-9: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf Kalksandsteinmauerwerk mit Gipsputz unter Berücksichtigung der Lebensdauer

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Kalksandsteinmauerwerk mit Gipsputz			
	Fliese (kein Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (kein Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	7,86E+01	1,06E+01	7,90E+01	9,01E+01
Primärenergie regenerierbar [MJ]	1,45E+00	1,23E+01	1,32E+00	1,55E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	3,43E-02	3,96E-03	3,37E-02	3,48E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	5,14E+00	8,93E-03	3,55E+00	-1,07E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	1,00E-02	4,33E-03	5,21E-02	8,46E-03
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	7,14E-04	6,41E-04	9,39E-03	1,03E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	9,35E-04	5,29E-04	8,56E-04	1,24E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	1,99E-07	5,85E-08	2,34E-07	4,75E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	3,19E-01	3,70E-01	1,85E+00	4,26E-01

Tabelle I-10: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf Kalksandsteinmauerwerk mit Gipsputz unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Kalksandsteinmauerwerk mit Gipsputz			
	Fliese (1x Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (1x Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	1,63E+02	1,06E+01	7,90E+01	1,78E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	3,25E+00	1,23E+01	1,32E+00	3,10E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	7,07E-02	3,96E-03	3,37E-02	6,83E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	1,12E+01	8,93E-03	3,55E+00	-2,09E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	2,24E-02	4,33E-03	5,21E-02	1,80E-02
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	1,71E-03	6,41E-04	9,39E-03	2,11E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	2,11E-03	5,29E-04	8,56E-04	2,64E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	4,22E-07	5,85E-08	2,34E-07	9,67E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	8,51E-01	3,70E-01	1,85E+00	1,06E+00

Anhang I - Umweltwirkungen von Wandbekleidungen und Bodenbelägen

Tabelle I-11: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf einer Stahlbetonwand mit Zementputz unter Berücksichtigung der Lebensdauer

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Stahlbetonwand mit Zementputz			
	Fliese (kein Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (kein Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	5,78E+01	9,94E+00	9,80E+01	9,40E+01
Primärenergie regenerierbar [MJ]	1,19E+00	1,36E+01	1,64E+00	1,46E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	2,51E-02	3,62E-03	4,18E-02	3,68E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	3,90E+00	-7,90E-02	4,40E+00	-9,67E+00
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	7,58E-03	3,81E-03	6,51E-02	1,35E-02
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	5,71E-04	5,20E-04	1,17E-02	2,05E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	7,33E-04	5,61E-04	1,06E-03	1,28E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	1,49E-07	5,93E-08	2,90E-07	4,64E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	2,65E-01	3,50E-01	1,74E+00	4,00E-01

Tabelle I-12: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf einer Stahlbetonwand mit Zementputz unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Stahlbetonwand mit Zementputz			
	Fliese (1x Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (1x Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	1,55E+02	9,94E+00	9,80E+01	1,86E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	6,02E+00	1,36E+01	1,64E+00	2,91E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	6,68E-02	3,62E-03	4,18E-02	7,26E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	1,37E+01	-7,90E-02	4,40E+00	-1,88E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	2,64E-02	3,81E-03	6,51E-02	2,79E-02
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	2,31E-03	5,20E-04	1,17E-02	4,14E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	3,61E-03	5,61E-04	1,06E-03	2,69E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	4,41E-07	5,93E-08	2,90E-07	9,44E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	1,25E+00	3,50E-01	1,74E+00	1,00E+00

Tabelle I-13: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf einer Stahlbetonwand mit Gipsputz unter Berücksichtigung der Lebensdauer

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Stahlbetonwand mit Gipsputz			
	Fliese (kein Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (kein Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	5,71E+01	1,04E+01	1,00E+02	8,47E+01
Primärenergie regenerierbar [MJ]	1,12E+00	1,23E+01	1,69E+00	1,46E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	2,48E-02	3,86E-03	4,27E-02	3,27E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	3,80E+00	-3,42E-03	4,57E+00	-1,01E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	7,38E-03	4,19E-03	6,57E-02	7,96E-03
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	5,42E-04	6,13E-04	1,19E-02	9,71E-04
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	7,03E-04	5,26E-04	1,10E-03	1,17E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	1,46E-07	5,78E-08	2,97E-07	4,46E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	2,65E-01	3,50E-01	1,74E+00	4,00E-01

Tabelle I-14: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Wandbekleidungen auf einer Stahlbetonwand mit Gipsputz unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Stahlbetonwand mit Gipsputz			
	Fliese (1x Austausch)	Tapete (3x Austausch)	Farbe (4x Austausch)	Holzverkleidung (1x Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	1,17E+02	1,04E+01	1,00E+02	1,68E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	2,35E+00	1,23E+01	1,69E+00	2,91E+02
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	5,10E-02	3,86E-03	4,27E-02	6,42E-02
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	8,24E+00	-3,42E-03	4,57E+00	-1,96E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	1,66E-02	4,19E-03	6,57E-02	1,69E-02
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	1,32E-03	6,13E-04	1,19E-02	1,98E-03
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	1,58E-03	5,26E-04	1,10E-03	2,48E-03
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	2,99E-07	5,78E-08	2,97E-07	9,09E-07
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	6,96E-01	3,50E-01	1,74E+00	1,00E+00

H.2 Bodenbeläge

Tabelle I-15: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Bodenbeläge auf Zementestrich unter Berücksichtigung der Lebensdauer

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Zementestrich			
	Fliese (kein Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (kein Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	7,89E+01	6,84E+02	5,77E+02	3,59E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	1,63E+00	4,84E+02	1,21E+01	2,32E+01
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	3,43E-02	2,36E-01	2,41E-01	1,39E-01
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	5,29E+00	3,00E-01	5,02E+01	2,75E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	1,03E-02	1,40E-01	1,36E-01	3,49E-01
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	7,66E-04	4,73E-02	3,02E-02	1,95E-02
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	9,86E-04	3,13E-02	1,72E-02	2,11E-02
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	2,06E-07	2,45E-06	1,76E-06	1,90E-06
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	4,16E-01	2,08E+00	1,72E+00	4,16E-01

Tabelle I-16: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Bodenbeläge auf Zementestrich unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Zementestrich			
	Fliese (1x Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (1x Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	1,94E+02	6,84E+02	5,77E+02	7,59E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	4,62E+00	4,84E+02	1,21E+01	4,78E+01
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	7,19E-02	2,36E-01	2,41E-01	2,81E-01
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	1,39E+01	3,00E-01	5,02E+01	5,89E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	2,90E-02	1,40E-01	1,36E-01	7,08E-01
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	2,59E-03	4,73E-02	3,02E-02	4,02E-02
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	3,17E-03	3,13E-02	1,72E-02	4,35E-02
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	5,40E-07	2,45E-06	1,76E-06	3,94E-06
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	1,45E+00	2,08E+00	1,72E+00	1,26E+00

Tabelle I-17: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Bodenbeläge auf Anhydritestrich unter Berücksichtigung der Lebensdauer

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Anhydritestrich			
	Fliese (kein Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (kein Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	7,58E+01	5,94E+02	4,19E+02	3,59E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	1,36E+00	4,81E+02	1,02E+01	2,32E+01
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	3,30E-02	2,47E-01	1,73E-01	1,39E-01
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	4,86E+00	-6,69E+00	3,43E+01	2,75E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	9,44E-03	1,23E-01	9,42E-02	3,49E-01
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	6,51E-04	4,47E-02	2,07E-02	1,95E-02
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	8,62E-04	2,81E-02	1,16E-02	2,10E-02
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	1,94E-07	2,17E-06	1,36E-06	1,90E-06
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	4,16E-01	2,08E+00	2,22E+00	4,16E-01

Tabelle I-18: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Bodenbeläge auf Anhydritestrich unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Anhydritestrich			
	Fliese (1x Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (1x Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	1,66E+02	5,94E+02	4,19E+02	7,34E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	3,66E+00	4,81E+02	1,02E+01	4,70E+01
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	7,15E-02	2,47E-01	1,73E-01	2,84E-01
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	1,12E+01	-6,69E+00	3,43E+01	5,69E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	2,32E-02	1,23E-01	9,42E-02	7,04E-01
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	1,85E-03	4,47E-02	2,07E-02	3,96E-02
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	2,12E-03	2,81E-02	1,16E-02	4,27E-02
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	4,58E-07	2,17E-06	1,36E-06	3,86E-06
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	1,52E+00	2,08E+00	2,22E+00	1,23E+00

Anhang I - Umweltwirkungen von Wandbekleidungen und Bodenbelägen

Tabelle I-19: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Bodenbeläge auf Gussasphaltestrich unter Berücksichtigung der Lebensdauer

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Gussasphaltestrich			
	Fliese (kein Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (kein Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	6,99E+01	6,75E+02	5,69E+02	3,23E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	1,35E+00	4,84E+02	1,36E+01	2,08E+01
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	3,04E-02	2,40E-01	2,35E-01	1,25E-01
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	4,59E+00	-6,69E-01	4,75E+01	2,46E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	8,91E-03	1,41E-01	1,21E-01	3,15E-01
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	6,42E-04	4,87E-02	2,44E-02	1,75E-02
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	8,36E-04	3,07E-02	1,64E-02	1,89E-02
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	1,80E-07	2,42E-06	1,84E-06	1,71E-06
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	3,75E-01	2,08E+00	2,16E+00	3,75E-01

Tabelle I-20: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Bodenbeläge auf Gussasphaltestrich unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Gussasphaltestrich			
	Fliese (1x Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (1x Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	1,70E+02	6,75E+02	5,69E+02	6,73E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	4,60E+00	4,84E+02	1,36E+01	4,24E+01
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	6,62E-02	2,40E-01	2,35E-01	2,52E-01
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	1,19E+01	-6,69E-01	4,75E+01	5,21E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	2,44E-02	1,41E-01	1,21E-01	6,37E-01
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	2,07E-03	4,87E-02	2,44E-02	3,60E-02
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	2,50E-03	3,07E-02	1,64E-02	3,89E-02
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	5,13E-07	2,42E-06	1,84E-06	3,50E-06
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	1,88E+00	2,08E+00	2,16E+00	1,06E+00

Tabelle I-21: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Bodenbeläge auf Trockenestrich unter Berücksichtigung der Lebensdauer

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Trockenestrich			
	Fliese (kein Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (kein Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	7,69E+01	8,63E+02	4,02E+02	3,22E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	1,45E+00	4,45E+02	8,44E+00	2,08E+01
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	3,35E-02	3,68E-01	1,68E-01	1,25E-01
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	5,03E+00	1,27E+01	3,48E+01	2,46E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	9,77E-03	1,32E-01	9,46E-02	3,15E-01
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	6,98E-04	4,14E-02	2,07E-02	1,75E-02
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	9,15E-04	2,98E-02	1,19E-02	1,89E-02
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	1,97E-07	2,73E-06	1,23E-06	1,71E-06
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	3,75E-01	1,62E+00	1,19E+00	3,75E-01

Tabelle I-22: Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Bodenbeläge auf Trockenestrich unter Berücksichtigung eines Mindestaustauschs

Umweltwirkung über den Betrachtungszeitraum (50 Jahre)	Trockenestrich			
	Fliese (1x Austausch)	Laminat (3x Austausch)	Teppich (4x Austausch)	Naturstein (1x Austausch)
Primärenergie nicht regenerierbar [MJ]	2,79E+02	8,63E+02	4,02E+02	8,04E+02
Primärenergie regenerierbar [MJ]	5,18E+00	4,45E+02	8,44E+00	4,42E+01
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) [kg Sb-Äqv.]	1,22E-01	3,68E-01	1,68E-01	3,19E-01
Treibhauspotential (GWP 100) [kg CO ₂ -Äqv.]	1,86E+01	1,27E+01	3,48E+01	6,01E+01
Versauerungspotential (AP) [kg SO ₂ -Äqv.]	3,34E-02	1,32E-01	9,46E-02	6,47E-01
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP) [kg Ethen-Äqv.]	3,00E-03	4,14E-02	2,07E-02	3,70E-02
Eutrophierungspotential (EP) [kg PO ₄ -Äqv.]	3,78E-03	2,98E-02	1,19E-02	4,03E-02
Ozonabbaupotential (ODP) [kg R ₁₁ -Äqv.]	7,28E-07	2,73E-06	1,23E-06	3,84E-06
Arbeitsstunden Personal [h/m ²]	1,25E+00	1,62E+00	1,19E+00	1,25E+00

Dissertationsreihe

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Institut für Massivbau
Technische Universität Darmstadt

- Heft 1: **Stefan Kempf (2001)**
Technische und wirtschaftliche Bewertung der Mindestbewehrungsregeln für Stahlbetonbauteile
- Heft 2: **Katja Reiche (2001)**
Nachhaltigkeitsanalyse demontagegerechter Baukonstruktionen - Entwicklung eines Analysemodells für den Entwurf von Gebäuden
- Heft 3: **Michael Six (2001)**
Sicherheitskonzept für nichtlineare Traglastverfahren im Betonbau
- Heft 4: **Eric Simon (2002)**
Schubtragverhalten von Mauerwerk aus großformatigen Steinen
- Heft 5: **Holger Schmidt (2003)**
Versagenswahrscheinlichkeit unbewehrter Wand-Decken-Verbindungen bei Gasexplosionen im Fertigteilbau
- Heft 6: **Andreas Bachmann (2003)**
Ein wirklichkeitsnaher Ansatz der böenerregten Windlasten auf Hochhäuser in Frankfurt/Main
- Heft 7: **Duy Tien Nguyen (2004)**
Rotationskapazität von biegebeanspruchten Stahlbetonbauteilen mit Schubrissbildung
- Heft 8: **Gert Wolfgang Riegel (2004)**
Ein softwaregestütztes Berechnungsverfahren zur Prognose und Beurteilung der Nutzungskosten von Bürogebäuden
- Heft 9: **Christian Glock (2004)**
Traglast unbewehrter Beton- und Mauerwerkswände - Nichtlineares Berechnungsmodell und konsistentes Bemessungskonzept für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung
- Heft 10: **Kati Herzog (2005)**
Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen - Entwicklung eines Modells und einer Softwarekomponente zur ökonomischen Analyse und Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden

- Heft 11: **Andreas Garg (2006)**
Spannungszustände in Fahrbahnplatten weit gespannter Stahlverbundbrücken - Empfehlungen für die Herstellung der Ortbeton-Fahrbahnplatte von Talbrücken mit der Schalwagenmethode
- Heft 12: **Tilo Proske (2007)**
Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton - Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung
- Heft 13: **Simon Glowienka (2007)**
Zuverlässigkeit von großformatigem Mauerwerk - Probabilistische Analyse von großformatigem Mauerwerk aus Kalksandstein und Porenbeton mit Dünnbettvermörtelung
- Heft 14: **Alexander Renner (2007)**
Energie- und Ökoeffizienz von Wohngebäuden - Entwicklung eines Verfahrens zur lebenszyklusorientierten Bewertung der Umweltwirkungen unter besonderer Berücksichtigung der Nutzungsphase
- Heft 15: **Guido Hausmann (2007)**
Verformungsvorhersage vorgespannter Flachdecken unter Berücksichtigung der stochastischen Eigenschaften
- Heft 16: **Stefan Daus (2007)**
Zuverlässigkeit des Klebeverbundes von nachträglich verstärkten Betonbauteilen – Sicherheitskonzept für den Verbundnachweis von oberflächlich geklebter Bewehrung
- Heft 17: **Thomas Kranzler (2008)**
Tragfähigkeit überwiegend horizontal beanspruchter Aussteifungsscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk
- Heft 18: **Lars Richter (2009)**
Tragfähigkeit nichttragender Wände aus Mauerwerk – Ein nichtlineares Berechnungsmodell und Bemessungsverfahren für biegebeanspruchte Innen- und Außenwände
- Heft 19: **Markus Spengler (2010)**
Dynamik von Eisenbahnbrücken unter Hochgeschwindigkeitsverkehr Entwicklung eines Antwortspektrums zur Erfassung der dynamischen Tragwerksreaktion
- Heft 20: **Linh Ngoc Tran (2011)**
Berechnungsmodell zur vereinfachten Abschätzung des Ermüdungsverhaltens von Federplatten bei Fertigträgerbrücken

Heft 21 **Carmen Schneider (2011)**

Steuerung der Nachhaltigkeit im Planungs- und Realisierungsprozess von Büro- und Verwaltungsgebäuden - Entwicklung eines Instrumentes zur Vorbewertung und Optimierung der Nachhaltigkeitsqualität

Heft 22 **Frank Ritter (2011)**

Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen – Modellierung und praxisnahe Prognose

Frank Ritter

Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen

Im Rahmen des gestiegenen Nachhaltigkeitsbewusstseins ist das Wissen um die realitätsnahe Lebenserwartung einer Konstruktion bzw. ihrer Bauteile sowohl für die Durchführung von Lebenszyklusanalysen als auch zur Planung von Instandsetzungsstrategien in zunehmendem Maße erforderlich.

Diese Arbeit enthält eine systematische Untersuchung der lebensdauerbeeinflussenden Faktoren von Bauteilen und Bauelementen. Anhand einer umfangreichen Datenerhebung werden Erfahrungswerte über die Lebensdauer von Bauteilen sowie deren Einflussgrößen gesammelt, um die wesentlichen Einflussgrößen auf die Lebensdauer von Bauteilen identifizieren und quantifizieren zu können. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird ein Verfahren zur Vorhersage objektspezifischer Bauteillebensdauern in Abhängigkeit der wesentlichen Einflussgrößen entwickelt.

Somit können bereits bei der Planung von Gebäuden die entsprechenden Bauprodukte und Bauteile derart aufeinander abgestimmt werden, dass die Stoff- und Energieflüsse reduziert und die Lebenszykluskosten minimiert werden. Der Einsatz von Bauteilen und Baustoffen nach vordergründig wirtschaftlichen Gesichtspunkten kann zukünftig im Sinne einer lebenszyklusgerechten Planung vermieden werden.

ISBN 978-3-942886-00-0